

**INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA EN LAS RELACIONES DE VACÍOS
MÁXIMAS Y MÍNIMAS DE SUELOS GRANULARES**

JORGE ANDRES BARROS AYALA



UNIVERSIDAD DE LA COSTA, CUC
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BARRANQUILLA
2019

**INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA EN LAS RELACIONES DE VACÍOS
MÁXIMAS Y MÍNIMAS DE SUELOS GRANULARES**

JORGE ANDRES BARROS AYALA

**PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN PRESENTADO COMO REQUISITO
PARCIAL PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO(A) CIVIL**

I.C, M.SC. JOSE ALEJANDRO DUQUE

I.C, M.SC. NAIRO TARAZONA BUITRAGO

UNIVERSIDAD DE LA COSTA, CUC

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

BARRANQUILLA

2019

Nota de aceptación

Presidente de Jurado

Jurado

Jurado

Barranquilla, _____ 2019

Dedicatoria

Esta tesis se la dedico a mis padres, Jorge Barros Coba y Patricia Ayala Molina, por el amor y apoyo incondicional que siempre me han brindado y me brindaran, siempre alentándome a cumplir mis metas y sueños. Esto va por ellos, por todo el esfuerzo y dedicación que ejercieron en mí, dándome la oportunidad de prepararme para obtener mi título profesional.

Agradecimientos

Expreso mis más sinceros agradecimientos a los profesores M.Sc. Jose Alejandro Duque y M.Sc. Nairo Tarazona Buitrago por su ayuda a lo largo de esta investigación. También agradezco al laboratorio de la Universidad de la Costa por su colaboración prestada durante la fase de experimentación de esta investigación.

Resumen

Las observaciones experimentales indican que el comportamiento mecánico de los suelos no depende solo de su estructura y de los estados de esfuerzos, sino también de sus relaciones de vacíos. Esta última corresponde al volumen de vacíos de un suelo entre su volumen de sólidos. La relación de vacíos se encuentra en un rango delimitado por la relación de vacíos máxima, que se da en el estado más suelto del material y la relación de vacíos mínima que se presenta en el máximo estado de densidad del material. Durante esta investigación se analiza la influencia de las características granulométricas de suelos granulares en las relaciones de vacíos mínimas y máximas.

La investigación fue desarrollada en tres fases, en la primera se construyeron artificialmente veinte curvas granulométricas de suelos con características granulares, agrupadas en cuatro grupos de a cinco curvas con diámetro promedio del material aproximadamente igual.

Posteriormente, en la segunda fase de esta investigación se determinaron las relaciones de vacíos máximas y mínimas para cada una de las curvas granulométricas creadas. Finalmente, se propusieron correlaciones estadísticas entre las características granulométricas y las relaciones de vacíos máximas y mínimas para los datos obtenidos en el laboratorio y datos reportados en la literatura.

Palabras clave: *Distribución granulométrica, relación de vacíos máxima, relación de vacíos mínima, suelos granulares*

Abstract

The experimental observations indicate that the mechanic behavior of the soils does not only depend on its structure and state of stresses, but also on its void ratios. This last one corresponds to the volume of voids of a soil within its volume of solids. The void ratios are between the range given by the maximum void ratio, which is given at the loosest state of the material and the minimum void ratio in the densest state of the material.

The investigation was developed in three phases, in the first one twenty artificial granulometric soils were built with granular characteristics, split into four groups of five curves with an average diameter of the material which are approximately equal. Then, in the second phase of this investigation, the maximum and minimum void ratios were determined for every granulometric curve created.

Finally, statistic correlations were proposed between the granulometric characteristics and the maximum and minimum void ratios for the obtained data in the lab and the data reported in the literature.

Keywords: *Grain size distribution maximum void ratio, minimum void ratio, granular soils*

Contenido

Lista de tablas y figuras.....	9
Introducción.....	12
1. Planteamiento del problema	14
2. Objetivos	15
2.1. Objetivo General	15
2.2. Objetivos específicos	15
3. Estado del arte	16
3.1. Correlaciones con las relaciones vacíos máxima y mínima.....	17
4. Experimentos.....	23
4.1. Preparación de la muestra	23
4.2. Gravedad Específica	25
4.3. Granulometría	26
4.4. Relaciones de vacío.....	31
4.4.1. Relación de vacíos Máxima	31
4.4.2. Relación de vacíos Mínima.....	34
5. Análisis estadístico entre granulometría y relaciones de vacío	37
5.1. Análisis estadísticos para los ensayos ejecutados en esta investigación.....	37
5.2. Análisis estadístico para una base de datos reportados en la literatura.....	49
6. Conclusiones	62
7. Limitaciones	63
8. Referencias	64
Anexos.....	67

Lista de tablas y figuras**Tablas**

Tabla 1. Tamices utilizados para la separación del material y elaboración de curvas granulométricas.	24
Tabla 2. Ensayo de gravedad específica.....	26
Tabla 3. Porcentaje que pasa por cada tamiz de la muestra 1 a la 10.....	27
Tabla 4. Porcentaje que pasa por cada tamiz de la muestra 11 a la 20.....	28
Tabla 5. Clasificación de las 20 muestras por el método de la USCS y la AASTHO	30
Tabla 6. Datos principales para calcular las relaciones de vacío.	32
Tabla 7. Resultados para las relaciones de vacíos máxima.....	33
Tabla 8. Resultados para las relaciones de vacío mínima.	36
Tabla 9. Características granulométricas y relaciones de vacíos máximas y mínimas.	38
Tabla 10. ANOVA del análisis estadístico de la relación de vacíos máxima.	42
Tabla 11. Constantes de calibración para la relación de vacíos máxima.	43
Tabla 12. ANOVA del análisis estadístico de la relación de vacíos mínima.	44
Tabla 13. Resultados de las constantes de calibración para la relación de vacíos mínima.	46
Tabla 14. Características granulométricas y de relaciones de vacíos máximas y mínimas para los 76 datos analizados.....	49
Tabla 15. Rango de variables utilizadas para la estimación de relaciones de vacíos.....	54
Tabla 16. ANOVA del análisis estadístico de la relación de vacíos máxima.	54
Tabla 17. Resultados de las constantes de calibración para la relación de vacíos máxima.	55
Tabla 18. ANOVA del análisis estadístico de la relación de vacíos mínima.	57
Tabla 19. Resultados de las constantes de calibración para la relación de vacíos mínima.	58

Figuras

Figura 1. Modelo de suelo representando las partículas sólidas y los vacíos existentes en él....	16
Figura 2. Rangos granulométricos de los suelos	18
Figura 3. Correlación entre relaciones de vacíos máximas y mínimas.	19
Figura 4. Relación de vacíos contra coeficiente de uniformidad..	20
Figura 5. Tamaño promedio de muestra para el lavado.	23
Figura 6. Lavado del material obtenido.....	24
Figura 7. Separación del material por tamices.	25
Figura 8. Curvas granulométricas de las 20 muestras ensayadas en laboratorio.	27
Figura 9. Carta para la clasificación de suelos, según el Sistema unificado de clasificación de suelos.....	29
Figura 10. Carta para la clasificación de suelos, según la American Association of State Highway and Transportation Officials.....	29
Figura 11. Material mezclado para el ensayo de relación de vacíos.	31
Figura 12. Molde de Proctor sin anillo superior con arena suelta.	32
Figura 13. tapa plástica de 9.99cm de diámetro para cilindro de Proctor.	34
Figura 14. Material vibrado con mínimos vacíos.....	35
Figura 15. e_{min} vs D50	39
Figura 16. e_{max} vs D50	40
Figura 17. Comparación de la relación de vacíos máxima medida y calculada.....	47
Figura 18. Comparación de la relación de vacíos mínima medida y calculada.	48
Figura 19. Correlación lineal entre relación de vacíos máxima y mínima.....	49
Figura 20. Comparación de la relación de vacíos máxima medida y calculada.....	59

Figura 21. Comparación de la relación de vacíos mínima medida y calculada.60

Figura 22. Correlación lineal entre relación de vacíos máxima y mínima.61

Introducción

Uno de los aspectos más importantes de la ingeniería geotécnica es conocer la composición y las características del suelo de apoyo, por esto se realizan constantemente investigaciones avanzadas acerca del comportamiento mecánico del material. Entre las variables que afectan la respuesta del suelo se encuentra entre otras las relaciones de vacío. Esta última hace referencia al volumen de los vacíos de un suelo entre el volumen de sus sólidos (Braja, 2013).

La relación de vacíos indica el estado de compacidad de un material, el cual puede estar entre el rango de muy suelto a muy denso. El valor de la relación de vacíos se encuentra siempre el intervalo entre las relaciones de vacío máximas y mínimas (Mahmoudi, Cherif, Belkhatir, Arab, & Schanz, 2014). La relación de vacíos máxima se presenta en el estado más suelto del suelo y la relación de vacíos mínimas se presenta en el estado más denso del suelo.

Dentro de los indicadores más comunes de la compacidad de los suelos se encuentra la densidad relativa, la cual explica el grado de compactación del suelo. La densidad relativa permite entre otros, estudiar el grado de compactación (Aberg, 1996) (Barton, Cresswell, & Brown, 2001) y el potencial de licuación de suelos granulares (Aberg, 1992) (Amini & Qi, 2000). Este parámetro es función de las relaciones de vacíos máximas y mínimas del suelo.

Se ha comprobado que existe una relación entre las características granulométricas del suelo y sus relaciones de vacíos máximas y mínimas. Entre los estudios existentes en la literatura se encuentran los reportados por (Misko & Kenji, 2002) (Patra, Nagaratnam, & Shuvranshu, 2010) (Riquelme & Dorador, 2014), los cuales desarrollaron correlaciones entre las características granulométricas y las relaciones de vacíos máximas y mínimas.

A pesar de las investigaciones existentes entre las relaciones de vacíos máximas y mínimas con las características granulométricas, aún persisten problemas para determinar estos valores debido a las limitaciones de las ecuaciones existentes. Entre las principales dificultades que presentan las ecuaciones propuestas, es que las regresiones han sido realizadas únicamente con el diámetro promedio de partículas, D_{50} y no explican realmente la variabilidad granulométrica del suelo. Es decir, suelos con granulometrías muy distintas pueden tener un mismo diámetro promedio de partículas y su comportamiento es diferente.

En esta investigación se propone una nueva correlación para determinar las relaciones de vacíos máximas y mínimas a partir de las características granulométricas de suelos granulares, pero considerando más variables granulométricas. Para esto, se implementó una gran base de datos experimentales de relaciones de vacíos máximas y mínimas de estudios reportados en la literatura especializada.

1. Planteamiento del problema

Las relaciones de vacío máxima y mínima juegan un papel importante en la ingeniería geotécnica, puesto estas delimitan los estados de densidad de materiales granulares. Adicionalmente, diversos parámetros geotécnicos relevantes son función de ellas, entre estos están la densidad relativa, la deformación volumétrica de suelos granulares y la compactabilidad. Para determinar los valores de las relaciones de vacío máxima y mínima, la American Society for Testing and Materials (ASTM) cuenta con las normativas ASTM D4254 – 16 y la ASTM D4253 - 16. Sin embargo, estos ensayos no son comúnmente ejecutados para proyectos geotécnicos convencionales.

Durante los años, autores como (Patra, Sivakugan, & Das, 2010) y (Rouse, Fannin, & Shuttle, 2008) han realizado esfuerzos en conjunto para desarrollar modelos matemáticos que permitan determinar las relaciones de vacío máxima y mínima mediante otras variables, entre ellas se encuentran la angularidad, regularidad, la actividad de suelos y las características granulométricas. Esta última es la comúnmente se utilizan debido a la simplicidad de las ecuaciones y a que las características granulométricas son usualmente determinadas en los estudios de suelo, ya que son esenciales para la clasificación de suelos. Sin embargo, las ecuaciones existentes entre las características granulométricas y las relaciones de vacíos máximas y mínimas han sido realizadas desarrolladas considerando únicamente el diámetro promedio de partículas, D_{50} y no explican la correctamente variabilidad granulométrica del suelo.

En esta investigación se propone una correlación para determinar las relaciones de vacíos máximas y mínimas a partir de las características granulométricas de suelos granulares, pero considerando más variables granulométricas, como lo son los diámetros por los que pasan el 10,

30 y 60% de las partículas, los cuales son siempre determinados puesto que se usan para determinar la clasificación según el Sistema Unificado de Clasificación de suelos.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Determinar correlaciones entre las relaciones de vacíos máxima y mínima con las características granulométricas del suelo.

2.2. Objetivos específicos

- Realizar ensayos de granulometría y relaciones de vacíos máxima y mínima.
- Efectuar un análisis estadístico para el análisis de los datos experimentales obtenidos.
- Realizar una base de datos de relaciones de vacíos máximas y mínimas a partir de los datos propios y de los existentes en la literatura.
- Desarrollar un modelo que explique la variabilidad granulométrica en términos de relaciones de vacíos máximas y mínimas.
- Determinar una relación lineal entre la relación de vacíos máxima y mínima.

3. Estado del arte

La relación de vacíos en su forma más sencilla se puede definir como el volumen de vacíos de un suelo entre su volumen de sólidos. Este parámetro es muy importante en la ingeniería geotécnica puesto que este determina los posibles estados de densidad de un material granular y de este dependen otros como la densidad relativa, que se implementa para determinar el grado de compactación de un suelo (Braja, 2013).

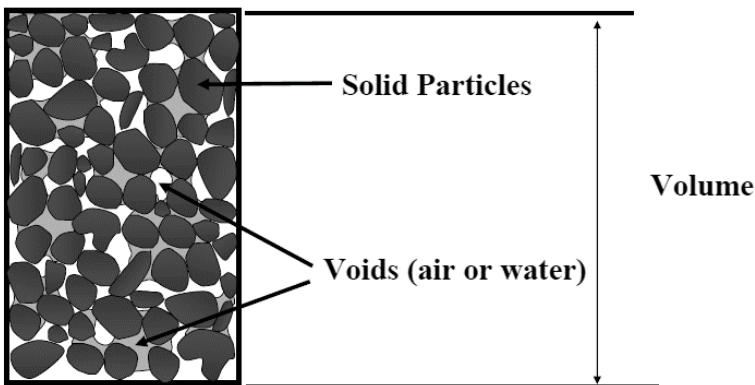


Figura 1. Modelo de suelo representando las partículas sólidas y los vacíos existentes en él. Fuente: (Das, 2008).

En términos de compacidad, la relación de vacíos se refiere al grado de acomodo de las partículas sólidas dejando ciertos vacíos entre ellas (ver *Figura 1*). Matemáticamente se expresa de la siguiente manera:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1)$$

En donde e es la relación de vacíos, V_v es el volumen de vacíos y V_s es el volumen de sólidos.

La relación de vacíos se usa para definir la consistencia de los suelos. Al conocer la relación de vacíos de un suelo granular en su estado natural, se puede determinar si el suelo se encuentra

en su estado suelto o denso, para esto, se necesita conocer la relación de vacíos "in situ" e y compararla con sus relaciones de vacíos máximas y mínima (Leoni, 2005) (Yilmaz, Mollamahmutoglu, Ozaydin, & Kayabali, 2009). Esta comparación se puede expresar en términos de la Densidad Relativa " D_r ", la cual se define en la ecuación 2 como:

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \quad (2)$$

Valores bajos de D_r indican que el suelo natural se encuentra en un estado suelto, y valores altos de D_r muestran que el suelo está en un estado denso.

La normativa usualmente aplicada para determinar estos parámetros son las propuestas por la American Society for Testing and Materials, las cuales se describen en la ASTM D4253 – 16 que detalla el método de prueba estándar para la densidad máxima (relación de vacíos mínima) y la ASTM D4254 – 16 que detalla el método de prueba estándar para la densidad mínima (relación de vacíos máxima) y el peso unitario de los suelos.

3.1. Correlaciones con las relaciones vacíos máxima y mínima

Una de las ecuaciones más recientes para correlacionar las relaciones de vacío máxima y mínima con la granulometría es la propuesta por (Patra, Sivakugan, & Das, 2010). Estos autores eligieron 55 muestras de arena limpia, 46 muestras de arena pobremente gradadas (SP) y 9 muestras de arena bien gradadas (SW) y realizaron un análisis granulométrico para cada uno de los suelos, midiendo su diámetro promedio de partículas (D_{50}), estas curvas se presentan en la Figura 2.

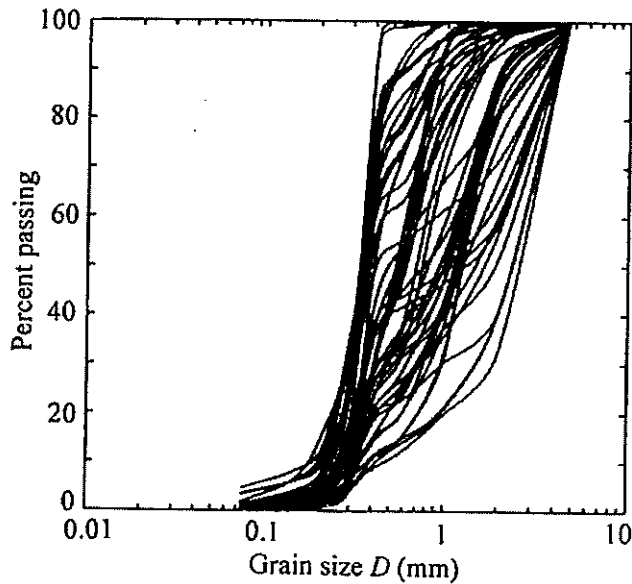


Figura 2. Rangos granulométricos de los suelos reportados por (Patra, Sivakugan, & Das, 2010).

Al final, propusieron correlaciones entre el diámetro medio y las relaciones de vacío máxima y mínima. Las ecuaciones propuestas presentan la limitación de que solo incluyen un diámetro de partícula, el cual puede ser igual para diferentes suelos.

$$e_{max} = 0.6042(D_{50})^{-0.304} \quad (5)$$

$$e_{min} = 0.3346(D_{50})^{-0.491} \quad (6)$$

Para e_{max} se tiene un R^2 de 0.7623 y para e_{min} se tiene un R^2 de 0.8516.

Por otra parte (Misko & Kenji, 2002) analizaron más de 300 suelos arenosos, incluyendo arenas limpias y con finos, las arenas que contienen un bajo porcentaje de arcilla fueron utilizadas para examinar la influencia del tamaño de grano con las relaciones de vacío máxima y mínima, esto con el fin de desarrollar correlaciones entre las relaciones de vacío máxima y mínima con la composición y forma de las partículas, (ver Figura 3). La composición general

del tamaño de grano y las características dadas de la arena, muestra como esta influye de manera relevante en el comportamiento mecánico del suelo.

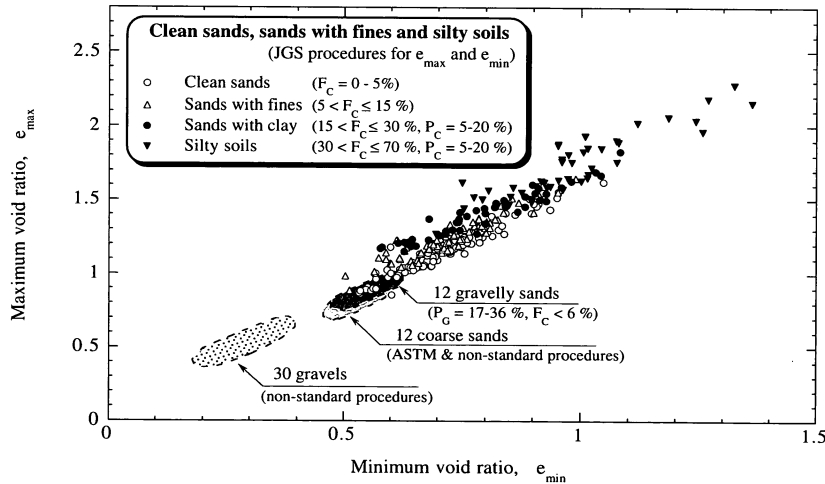


Figura 3. Correlación entre relaciones de vacíos máximas y mínimas reportado por (Misko & Kenji, 2002).

Las correlaciones que obtuvieron variando el porcentaje de finos, son las siguientes:

Para arenas limpias con un contenido de finos de 0 a 5%:

$$e_{max} = 0.072 + 1.53e_{min} \quad (7)$$

Para arenas con finos entre un 5 y 15%:

$$e_{max} = 0.25 + 1.37e_{min} \quad (8)$$

Para arenas con finos y arcillas con un contenido de finos entre un 15 y 30%:

$$e_{max} = 0.44 + 1.21e_{min} \quad (9)$$

Por otra parte, en suelos granulares gruesos, (Riquelme & Dorador, 2014) determinaron en el laboratorio densidades máximas y mínimas, junto con sus correspondientes relaciones de vacíos máximas y mínimas. A partir de los resultados, correlacionaron el coeficiente de

uniformidad (C_u) con las relaciones de vacío máxima y mínima. Adicionalmente, concluyeron que a mayores valores del coeficiente de uniformidad (C_u) la relación de vacío mínima y máxima disminuyen, ver Figura 4.

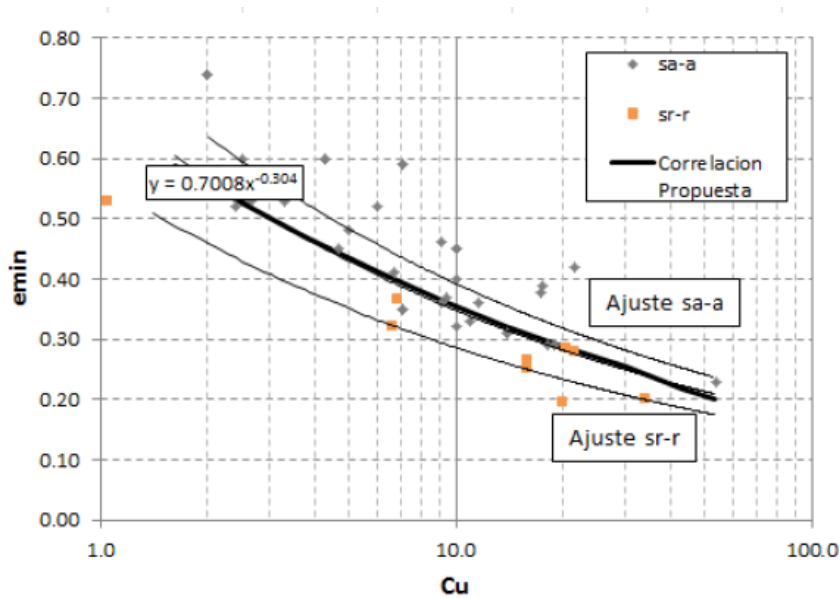


Figura 4. Relación de vacíos contra coeficiente de uniformidad. Fuente: (Riquelme & Dorador, 2014).

La correlación propuesta es aplicable para granulometrías con C_u hasta de 200, para mayores se estima como 200.

$$e_{\min} = 0.7008(C_u)^{-0.304} \quad (10)$$

Por otro lado, (Ching, Jia-Yi, & Louis, 2015) correlacionaron la tendencia de la relación de vacíos con el cambio de volumen de la muestra, la conductividad del fluido en los poros y la resistencia al corte. El modelo desarrollado fue evaluado con los resultados de 33 tipos de mezclas de suelo, incluyendo las encontradas en la literatura (Arena de Ottawa, arena de Nevada, arena de Toyura, arena de Hokksund, etc.) y sedimentos. Estos mismos autores, un año

después, hicieron un estudio que mostraba la variación de las relaciones de vacíos con el contenido de finos (Ching, Jia-Yi, & Louis, 2016).

Con respecto a los efectos acoplados del tamaño de partícula y como afecta su forma en las relaciones de vacíos (Ching, Yibing, & Mehrashk, 2018), propusieron ecuaciones multivariantes tomando como referencia otros modelos matemáticos de diferentes autores. A partir de esto se calcularon las relaciones de vacíos con los datos experimentales en su gran mayoría con muestras de arena uniformes.

Para la relación de vacíos máxima en función de la redondez se obtuvieron varios modelos matemáticos, entre ellos el de (Shimobe & Moroto, 1995), que se utilizaron muestras de arena uniforme:

$$e_{max} = 0.64(R)^{-0.354} \quad (11)$$

(Santamarina & Cho, 2004) Propuso una ecuación hiperbólica para la relación entre la redondez de partículas R y las relaciones de vacíos. Usando datos de (Youd, 1973) que incluyeron 8 muestras de arenas uniformes naturales.

$$e_{max} = 0.554 + 0.154(R)^{-1} \quad (12)$$

$$e_{min} = 0.359 + 0.082(R)^{-1} \quad (13)$$

(Cho, Dodds, & Santamarina, 2006) Determinaron una ecuación lineal simple para los parámetros ya mencionados anteriormente. Usaron 19 muestras para el e_{max} y 16 para el e_{min} , naturales y trituradas.

$$e_{max} = 1.30 - 0.62(R) \quad (14)$$

$$e_{min} = 0.80 - 0.34(R) \quad (15)$$

Por otro lado, (Rouse, Fannin, & Shuttle, 2008) usaron la misma ecuación de (Santamarina & Cho, 2004) y (Youd, 1973) pero con más datos, incluyendo los propios, de arenas y grava. 66 muestras para el e_{max} y 46 para el e_{min} . Todas uniformes.

$$e_{max} = 0.615 + 0.107(R)^{-1} \quad (16)$$

$$e_{min} = 0.433 + 0.051(R)^{-1} \quad (17)$$

A pesar de todas las investigaciones que se han realizado para calcular las relaciones de vacío máxima y mínima, se hace necesario buscar una ecuación que incluya más variables que solo un diámetro de partículas, ante esto se ha propuesto realizar un plan experimental con diferentes suelos y con suelos reportados en la literatura para proponer una ecuación general entre las relaciones de vacíos máximas y mínimas y la granulometría.

4. Experimentos

4.1. Preparación de la muestra

Para la realización de los ensayos que se presentaran a continuación se tomó un material de subbase granular, el cual es usualmente utilizado para la construcción de pavimentos. Este material fue obtenido en un acopio ubicado en Galapa – Atlántico. A partir de esto, se tomó como muestra inicial 80kg del material seleccionado, el cual se lavó por el tamiz #200, este proceso duró aproximadamente dos semanas, lavando entre unos 7 a 10 kg por día, esto con el fin de eliminar los finos que contenía este material. Posterior al lavado, cada porción de material fue colocada a secar en el horno a 110°C por 36 horas. La *Figura 5* presenta el tamaño aproximado de cada una de las muestras utilizadas para el lavado por tamiz #200. La *Figura 6* presenta el lavado del material.



Figura 5. Tamaño promedio de muestra para el lavado.

Nota: Muestras de aproximadamente 7 a 9kg, por J. Barros, 2018.



Figura 6. Lavado del material obtenido.

Nota: Se lavaba el material por el tamiz #200, por J. Barros, 2018.

Luego de que el material se encontraba seco, se procedió a tamizarlo usando el juego de tamices que se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1.

Tamices utilizados para la separación del material y elaboración de curvas granulométricas.

Abertura del tamiz (ASTM D6913 - 17)	Abertura del tamiz (mm)
2"	50
1 1/2"	37.50
1"	25
1/2"	12.7
3/8"	9.50
No. 4	4.75
No. 10	2
No. 40	0.425

No. 200

0.075

Nota: tamices seleccionados para la elaboración de las curvas granulométricas, por J. Barros, 2018.

Luego de tamizarlo, se procedió a guardarlos en bolsas plásticas impermeables para posteriormente hacer unas combinaciones de dicho material y generar curvas granulométricas con las características deseadas, ver Figura 7.



Figura 7. Separación del material por tamices.

Nota: Se observan el material ya separado por tamaño de partículas por los tamices ya mencionados, por J. Barros, 2018.

4.2. Gravedad Específica

La gravedad específica se realizó para varias curvas. La Tabla 2 presenta uno de los resultados obtenidos, que presenta un valor promedio de 2.65.

Tabla 2.

Ensayo de gravedad específica.

Parámetro	valor
Capacidad picnómetro cm^3	500
Peso picnómetro, gr.	133.4
Peso picnómetro + suelo seco, gr.	203.4
Peso suelo seco, gr. (W_s)	70
Peso picnómetro. + agua + suelo , gr. (w_1)	677
Peso picnómetro. + agua a temp. Ensayo.	633.4
Temperatura de ensayo, ° C	20.7
Gs a temperatura ensayo	2.65
GS A 20 ° C	2.65

Nota: Gravedad específica tomada en el laboratorio de la Universidad de la Costa, por J. Barros, 2018.

4.3. Granulometría

En esta sección se detallará el proceso de granulometría para las combinaciones que se realizaron con el material obtenido. Con base a esto se realizaron 20 curvas granulométricas que están compuestas completamente por arenas y gravas. La *Figura 8* presenta un resumen de las 20 curvas granulométricas creadas. Tal como se aprecia en la *Figura 8*, las curvas están agrupadas en grupos de cuatro materiales. Los tres primeros grupos de curvas tienen intercepto en diámetros de partículas cercanos al D_{50} , esto se realizó intencionalmente para probar la limitación que presentan las ecuaciones existentes, que aunque dos suelos tengan el mismo D_{50} y granulometría diferente, sus relaciones de vacío máximas y mínimas serán distintas. Por tanto,

las ecuaciones deben incluir más variables que el D_{50} . La Tabla 3 y la Tabla 4 resumen los resultados granulométricos de cada una de las curvas.

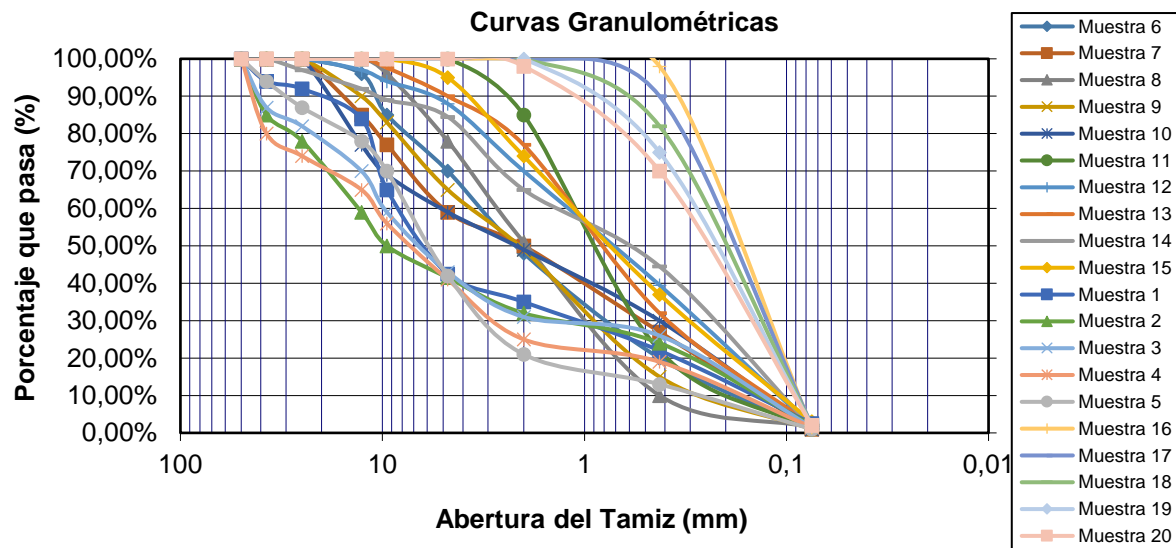


Figura 8. Curvas granulométricas de las 20 muestras ensayadas en laboratorio.

Nota: Se observa la división de grupos por tipo de suelo, desde arenas gruesas a arenas con partículas más pequeñas, por J. Barros, 2018.

Tabla 3.

Porcentaje que pasa por cada tamiz de la muestra 1 a la 10.

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Abertura											
del tamiz	Abertura										
(ASTM	del tamiz	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa
D6913 -	(mm)	total	total	total	total	total	total	total	total	total	total
17)											
2"	50	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
1 1/2"	37.50	94.00%	85.00%	87.00%	80.00%	94.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
1"	25	92.00%	78.00%	82.00%	74.00%	87.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
1/2"	12.7	84.00%	59.00%	70.00%	65.00%	78.00%	96.00%	85.00%	100.00%	90.00%	77.00%

3/8"	9.50	65.00%	50.00%	59.00%	56.00%	70.00%	85.00%	77.00%	96.00%	83.00%	69.00%
No. 4	4.75	42.50%	41.50%	43.00%	41.00%	42.00%	70.00%	59.00%	78.00%	65.00%	59.00%
No. 10	2	35.00%	32.00%	31.00%	25.00%	21.00%	48.00%	50.00%	51.00%	49.00%	49.00%
No. 40	0.425	22.00%	24.00%	26.00%	19.00%	13.00%	20.00%	27.00%	10.00%	15.00%	30.00%
No. 200	0.075	2.50%	2.00%	1.50%	1.50%	1.00%	1.00%	1.00%	1.50%	1.00%	1.00%

Nota: Relación de tamices usados con los porcentajes que pasan por dichos tamices, parte 1, por J. Barros, 2018.

Tabla 4.

Porcentaje que pasa por cada tamiz de la muestra 11 a la 20.

		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Abertura del tamiz (ASTM D6913 - 17)	Abertura del tamiz (mm)	% Pasa total	% Pasa total	% Pasa total	% Pasa total	% Pasa total	% Pasa total	% Pasa total	% Pasa total	% Pasa total	% Pasa total
2"	50	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
1 1/2"	37.50	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
1"	25	100.00%	100.00%	100.00%	97.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
1/2"	12.7	100.00%	97.00%	100.00%	92.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
3/8"	9.50	100.00%	94.00%	97.59%	89.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
No. 4	4.75	100.00%	88.00%	90.00%	84.50%	95.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
No. 10	2	85.00%	70.00%	77.00%	65.00%	74.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	98.00%
No. 40	0.425	22.00%	39.50%	32.00%	44.50%	37.00%	98.00%	90.00%	82.00%	75.00%	70.00%
No. 200	0.075	1.00%	1.80%	2.00%	1.50%	3.00%	1.50%	2.00%	2.00%	2.00%	2.00%

Nota: Relación de tamices usados con los porcentajes que pasan por dichos tamices, parte 2, por J. Barros, 2018.

Para clasificar cada una de las curvas granulométricas, se utilizaron los métodos del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y el de la AASTHO, ver

Figura 9 y Figura 10 respectivamente. La Tabla 5 presenta el resumen de los resultados obtenidos de las clasificaciones para las 20 curvas granulométricas.

SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS)

Criterio para la asignación de símbolos de grupo				Símbolos de grupo
Suelos de grano grueso Más de 50% retenido en el tamiz núm. 200	Gravas Más de 50% de fracción gruesa retenida en el tamiz núm. 4	Gravas limpias	$C_u \geq 4$ y $1 \leq C_c \leq 3^c$	GW
		Menos de 5% finos ^a	$C_u < 4$ y/o $1 > C_c > 3^c$	GP
		Gravas con finos	$PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2)	GM
		Más de 12% finos ^{a,d}	$PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2)	GC
	Arenas 50% o más de la fracción gruesa pasa tamiz núm. 4	Arenas limpias	$C_u \geq 6$ y $1 \leq C_c \leq 3^c$	SW
		Menos de 5% finos ^a	$C_u < 6$ y/o $1 > C_c > 3^c$	SP
Suelos de grano fino 50% o más pasa a través del tamiz núm. 200		Arenas con finos	$PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2)	SM
		Más de 12% finos ^{a,d}	$PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2)	SC
	Limos y arcillas Límite líquido menor que 50	Inorgánico	$PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2) ^e	CL
			$PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2) ^e	ML
		Orgánico	Límite líquido: secado	OL
			Límite líquido: no secado	OL
Suelos altamente orgánicos	Limos y arcillas Límite líquido 50 o más	Inorgánico	Gráficos PI en o por encima de línea "A" (figura 4.2)	CH
			Gráficos PI por debajo de "A" línea (figura 4.2)	MH
		Orgánico	Límite líquido: secado	OH
			Límite líquido: no secado	OH
Materia orgánica principalmente, color oscuro y orgánico				Pt

Figura 9. Carta para la clasificación de suelos, según el Sistema unificado de clasificación de suelos (después de ASTM, 2011).

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos pasa el tamiz #200)							Materiales limoarcillosos (más de 35% pasa el tamiz #200)			
Clasificación de grupo	A-1		A-3 ^A	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Tamizado, % que pasa											
No. 10 (2.00mm)	50 máx.	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 40 (425µm)	30 máx.	50 máx.	51 mín.	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 200 (75µm)	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Consistencia											
Límite líquido	...	...	...	B				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.	N.P.	N.P.	B				10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos de materiales característicos	Cantos, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limoarcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Calificación	Excelente a bueno							Regular a malo			

^a La colocación de A3 antes de A2 en el proceso de eliminación de izquierda a derecha no necesariamente indica superioridad de A3 sobre A2.

^b El índice de plasticidad del subgrupo A-7-5 es igual o menor que LL-30. El índice de plasticidad del subgrupo A-7-6 es mayor que LL-30.

Figura 10. Carta para la clasificación de suelos, según la American Association of State Highway and Transportation Officials.

Tabla 5.

Clasificación de las 20 muestras por el método de la USCS y la AASTHO

	USCS	AASTHO
Muestra 1	GW	A-1-a
Muestra 2	GW	A-1-a
Muestra 3	GW	A-1-a
Muestra 4	GW	A-1-a
Muestra 5	GW	A-1-a
Muestra 6	SW	A-1-a
Muestra 7	SW	A-1-a
Muestra 8	SW	A-1-b
Muestra 9	SW	A-1-a
Muestra 10	SW	A-1-a
Muestra 11	SP	A-1-a
Muestra 12	SW	A-1-b
Muestra 13	SW	A-1-b
Muestra 14	SW	A-1-b
Muestra 15	SW	A-1-b
Muestra 16	SP	A3
Muestra 17	SP	A3
Muestra 18	SP	A3
Muestra 19	SP	A3
Muestra 20	SP	A3

Nota: Se tomó en cuenta que estos materiales no tienen finos y por ende no tienen límites de atterberg, por J. Barros, 2018.

4.4. Relaciones de vacío

En esta sección se detallará como se realizaron los experimentos de relaciones de vacíos máximas y mínimas, para esto se debe tener en cuenta que alternamente después de realizar la granulometría de cada muestra de material, se realizaban los ensayos que se describirán a continuación:

4.4.1. Relación de vacíos Máxima

El primer ensayo a realizar es el de relación de vacío máxima. Para la ejecución de este ensayo y también para el de relación de vacío mínima se necesitó un molde de Proctor pequeño que tenía un peso de 5.235kg, un diámetro de 10cm y una altura total de 16.5cm, también se necesitó un embudo por el cual se vertía el material para que cayera de la manera más suelta posible, para así tener los máximos vacíos posibles.



Figura 11. Material mezclado para el ensayo de relación de vacíos.
Nota: Combinación de arenas gruesas y arenas con partículas más pequeñas, por J. Barros, 2018.

Para calcular la relación de vacío máxima, se vertió la muestra de arena en el molde hasta llenar el anillo inferior, cuyo peso era conocido (ver *Figura 12*). Luego de tener el molde lleno con la muestra, se pesó y con base a este peso, el volumen del cilindro, la gravedad específica y el peso específico del agua se calcularon los volúmenes de vacío y sólidos, la división de estos da como resultado la relación de vacío máxima. Los resultados se presentan en la Tabla 6 y Tabla 7.



Figura 12. Molde de Proctor sin anillo superior con arena suelta.

Nota: Se observa la arena suelta para proceder a calcular el peso de dicha muestra, por J. Barros, 2018.

Tabla 6.

Datos principales para calcular las relaciones de vacío.

Parámetro	Valor	Unidad
Gravedad específica	2.65	-
Peso específico del agua	9.81	kN/m ³
Diámetro anillo Proctor	0.1	m

Altura anillo inferior	0.115	m
Volumen Total anillo inferior	0.0009	m ³

Nota: Parámetros usados para el cálculo de las relaciones de vacío, máxima y mínima, por J. Barros, 2018.

Tabla 7.

Resultados para las relaciones de vacíos máxima.

	Masa seca (kg)	Peso seco (N)	Peso seco (kN)	Volumen de sólidos (m ³)	Volumen de vacíos (m ³)	e _{max} (-)
Granulometría 1	1.495	14.66595	0.01466595	0.000564151	0.000339057	0.60100
Granulometría 2	1.511	14.82291	0.01482291	0.000570189	0.000333019	0.58405
Granulometría 3	1.468	14.40108	0.01440108	0.000553962	0.000349246	0.63045
Granulometría 4	1.508	14.79348	0.01479348	0.000569057	0.000334151	0.58720
Granulometría 5	1.485	14.56785	0.01456785	0.000560377	0.000342831	0.61179
Granulometría 6	1.571	15.41151	0.01541151	0.00059283	0.000310378	0.52355
Granulometría 7	1.551	15.21531	0.01521531	0.000585283	0.000317925	0.54320
Granulometría 8	1.507	14.78367	0.01478367	0.000568679	0.000334529	0.58826
Granulometría 9	1.546	15.16626	0.01516626	0.000583396	0.000319812	0.54819
Granulometría 10	1.530	15.0093	0.0150093	0.000577358	0.000325849	0.56438
Granulometría 11	1.395	13.68495	0.01368495	0.000526415	0.000376793	0.71577
Granulometría 12	1.414	13.87134	0.01387134	0.000533585	0.000369623	0.69272
Granulometría 13	1.407	13.80267	0.01380267	0.000530943	0.000372264	0.70114
Granulometría 14	1.426	13.98906	0.01398906	0.000538113	0.000365095	0.67847
Granulometría 15	1.418	13.91058	0.01391058	0.000535094	0.000368114	0.68794
Granulometría 16	1.232	12.08592	0.01208592	0.000464906	0.000438302	0.94278
Granulometría 17	1.234	12.10554	0.01210554	0.00046566	0.000437548	0.93963
Granulometría 18	1.240	12.1644	0.0121644	0.000467925	0.000435283	0.93024
Granulometría 19	1.217	11.93877	0.01193877	0.000459245	0.000443963	0.96672
Granulometría 20	1.203	11.80143	0.01180143	0.000453962	0.000449246	0.98961

Nota: Tabla que indica los resultados de las relaciones de vacío máxima, utilizando los parámetros de las relaciones gravimétricas, por J. Barros, 2018.

Se puede concluir que las relaciones de vacío varían de acuerdo con el tipo de partículas encontradas en la muestra, entre el tamaño de partículas sea mayor, su relación de vacíos máxima será menor puesto que una grava de un tamaño cualquiera ocupara un volumen solido mayor al correspondiente de varias partículas de arena que ocupen el mismo volumen que esa grava. Estos resultados están acordes a lo reportado por (Salgado & badini, 2000) (Patra, Nagaratnam, & Shuvranshu, 2010).

4.4.2. Relación de vacíos Mínima

Para el ensayo de relaciones de vacío mínima, el suelo debe ser vibrado para alcanzar su máximo estado de compactación (similar al proceso de un vibro compactador en la densificación de capas de pavimentos). Para esto, se implementó la tamizadora eléctrica, sobre la cual era depositado el recipiente con las muestras. Encima de las muestras se colocaba una tapa plástica con diámetro de 9.99 cm (ver *Figura 13*) y sobre ella se colocaban pequeñas pesas.



Figura 13. Tapa plástica de 9.99cm de diámetro para cilindro de Proctor.

Nota: Se utilizó para colocarla dentro del cilindro para que el material no se saliera por acto de la vibración, por J. Barros, 2018.

El proceso seguido para estos experimentos fue el siguiente:

- Se colocaba el cilindro completo, con el anillo superior, en la tamizadora eléctrica,
- Se vertía el material hasta casi llenar el molde
- Se colocaba la tapa, con pesas pequeñas encima.
- Se encendía la tamizadora eléctrica, a cronómetro de unos 2 minutos,
- Luego de haber terminado el proceso anterior, se retiraba el cilindro y con la ayuda de una espátula largase enrasaba el material,



Figura 14. Material vibrado con mínimos vacíos

Nota: Material con mínimos vacíos por la vibración por J. Barros, 2018.

- Posteriormente se pesaba lo que quedaba en el cilindro, asimismo se utilizó los parámetros ya mencionados en el subcapítulo de: *relaciones de vacío máxima*, para determinar la relación de vacíos mínima.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Tabla 8.

Resultados para las relaciones de vacío mínima.

	Masa húmeda (kg)	Masa seca (kg)	Peso seco (N)	Peso seco (kN)	Volumen de sólidos (m ³)	Volumen de vacíos (m ³)	e-min (-)
Granulometría 1	1.924	1.717857143	16.85217857	0.016852179	0.000648248	0.00025496	0.39330614
Granulometría 2	1.906	1.701785714	16.69451786	0.016694518	0.000642183	0.000261025	0.40646433
Granulometría 3	1.899	1.695535714	16.63320536	0.016633205	0.000639825	0.000263383	0.41164877
Granulometría 4	1.901	1.697321429	16.65072321	0.016650723	0.000640499	0.000262709	0.4101636
Granulometría 5	1.917	1.711607143	16.79086607	0.016790866	0.000645889	0.000257318	0.39839385
Granulometría 6	1.931	1.724107143	16.91349107	0.016913491	0.000650606	0.000252601	0.38825531
Granulometría 7	1.903	1.699107143	16.66824107	0.016668241	0.000641173	0.000262035	0.40868156
Granulometría 8	1.906	1.701785714	16.69451786	0.016694518	0.000642183	0.000261025	0.40646433
Granulometría 9	1.912	1.707142857	16.74707143	0.016747071	0.000644205	0.000259003	0.40205074
Granulometría 10	1.983	1.770535714	17.36895536	0.017368955	0.000668127	0.000235081	0.35185124
Granulometría 11	1.821	1.625892857	15.95000893	0.015950009	0.000613544	0.000289663	0.47211478
Granulometría 12	1.825	1.629464286	15.98504464	0.015985045	0.000614892	0.000288316	0.46888823
Granulometría 13	1.797	1.604464286	15.73979464	0.015739795	0.000605458	0.00029775	0.49177574
Granulometría 14	1.793	1.600892857	15.70475893	0.015704759	0.000604111	0.000299097	0.49510374
Granulometría 15	1.805	1.611607143	15.80986607	0.015809866	0.000608154	0.000295054	0.485164
Granulometría 16	1.594	1.423214286	13.96173214	0.013961732	0.000537062	0.000366146	0.68175722
Granulometría 17	1.609	1.436607143	14.09311607	0.014093116	0.000542116	0.000361092	0.66607894
Granulometría 18	1.615	1.441964286	14.14566964	0.01414567	0.000544137	0.00035907	0.65988917
Granulometría 19	1.621	1.447321429	14.19822321	0.014198223	0.000546159	0.000357049	0.65374523
Granulometría 20	1.597	1.425892857	13.98800893	0.013988009	0.000538073	0.000365135	0.678598

Nota: Tabla que indica los resultados de las relaciones de vacío mínima, utilizando los parámetros de las relaciones gravimétricas, por J. Barros, 2018.

De manera similar se puede decir que entre mayor sea el tamaño de partículas de un material menor serán sus relaciones de vacío mínima.

5. Análisis estadístico entre granulometría y relaciones de vacío

En esta sección se describen los análisis estadísticos realizados entre las características granulométricas de materiales granulares y sus relaciones de vacío máximas y mínimas para dos grupos de datos:

1. Los 20 ensayos realizados durante esta investigación y que fueron descritos en los capítulos de relaciones de vacíos máximas y mínimas.
2. Los 20 ensayos realizados durante esta investigación y datos reportados por otras investigaciones similares existentes en la literatura especializada. En esta condición se analizaron un total de 76 datos distintos de 13 artículos de investigación encontrados en la literatura especializada.

En ambos casos, se desarrollaron ecuaciones que permiten correlacionar los diámetros por los que pasan el 10, 30, 50 y 60% de las partículas del suelo (D_{10} , D_{30} , D_{50} , D_{60}) y las relaciones de vacíos máximas y mínimas (e_{max} y e_{min}).

5.1. Análisis estadísticos para los ensayos ejecutados en esta investigación

En esta sección se describen las correlaciones planteadas para los 20 ensayos realizados durante esta investigación. Los ensayos fueron ejecutados en los laboratorios de suelos y pavimentos de la Universidad de la Costa. La Tabla 9 presenta un resumen de las características granulométricas tomadas de cada uno de los ensayos ejecutados y los resultados obtenidos de las relaciones de vacíos máximas y mínimas.

Tabla 9.

Resumen de características granulométricas y relaciones de vacíos máximas y mínimas.

	D_{10}	D_{30}	D_{50}	D_{60}	Coef. Uniformidad	Coef. Gradación	e_{max}	e_{min}
G1	0.19	1.30	6.90	8.90	8.33	2.48	0.601	0.393
G2	0.18	2.00	10.00	14.00	77.78	1.59	0.584	0.406
G3	0.15	2.00	7.00	10.00	66.67	2.67	0.630	0.412
G4	0.20	3.00	7.80	11.00	55.00	4.09	0.587	0.410
G5	0.30	2.20	6.00	7.60	25.33	2.12	0.612	0.398
G6	0.19	0.80	2.20	3.20	16.84	1.05	0.524	0.388
G7	0.15	0.54	2.00	5.00	33.33	0.39	0.543	0.409
G8	0.45	1.00	1.95	2.90	6.44	0.77	0.588	0.406
G9	0.29	0.90	2.10	3.90	13.45	0.72	0.548	0.402
G10	0.14	0.42	2.10	5.10	36.43	0.25	0.564	0.352
G11	0.22	0.60	0.90	1.20	5.45	1.36	0.716	0.472
G12	0.12	0.30	0.75	1.30	10.83	0.58	0.693	0.469
G13	0.15	0.41	0.85	1.15	7.67	0.97	0.701	0.492
G14	0.11	0.24	0.67	1.60	14.55	0.33	0.678	0.495
G15	0.13	0.34	0.80	1.20	9.23	0.74	0.688	0.485
G16	0.09	0.13	0.18	0.20	2.22	0.94	0.943	0.682
G17	0.09	0.14	0.19	0.22	2.44	0.99	0.940	0.666
G18	0.092	0.14	0.20	0.25	2.72	0.85	0.930	0.660
G19	0.095	0.16	0.22	0.29	3.05	0.93	0.967	0.654
G20	0.098	0.17	0.25	0.31	3.16	0.95	0.990	0.679

Nota: Relaciones de vacío y parámetros de granulometría, por J. Barros, 2018.

A partir de los resultados de la Tabla 9, se desarrollaron correlaciones entre el diámetro por el que pasa el 50% de las partículas (D_{50}) y las relaciones de vacíos mínima), Las ecuaciones 18 y 19 describen estos análisis.

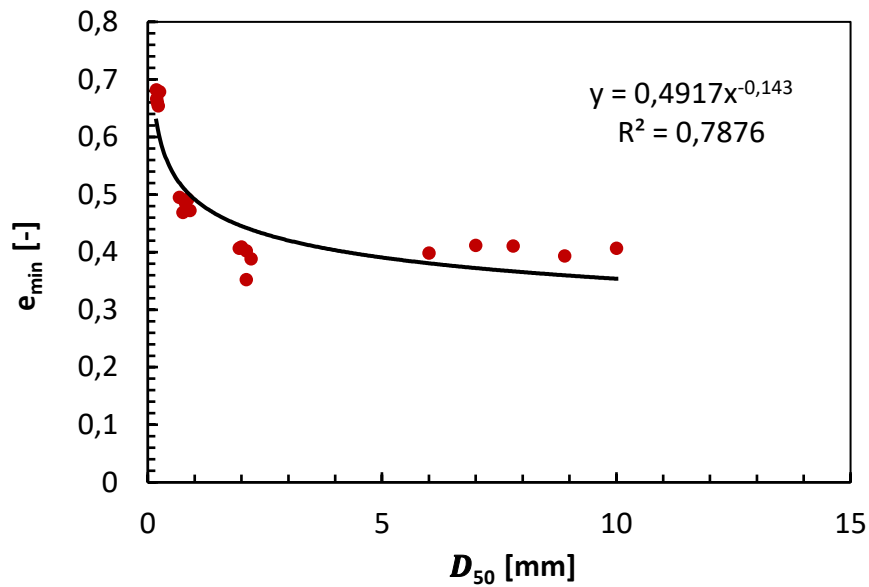


Figura 15. e_{min} vs D_{50}

Nota: Correlación entre el diámetro por el que pasan el 50% de las partículas (D_{50}) y la relación de vacíos mínima., por J. Barros, 2018.

$$e_{min} = 0.4917D_{50}^{-0.143} \quad (18)$$

Donde:

D_{50} Es el diámetro por el que pasa el 50% de las partículas en milímetros.

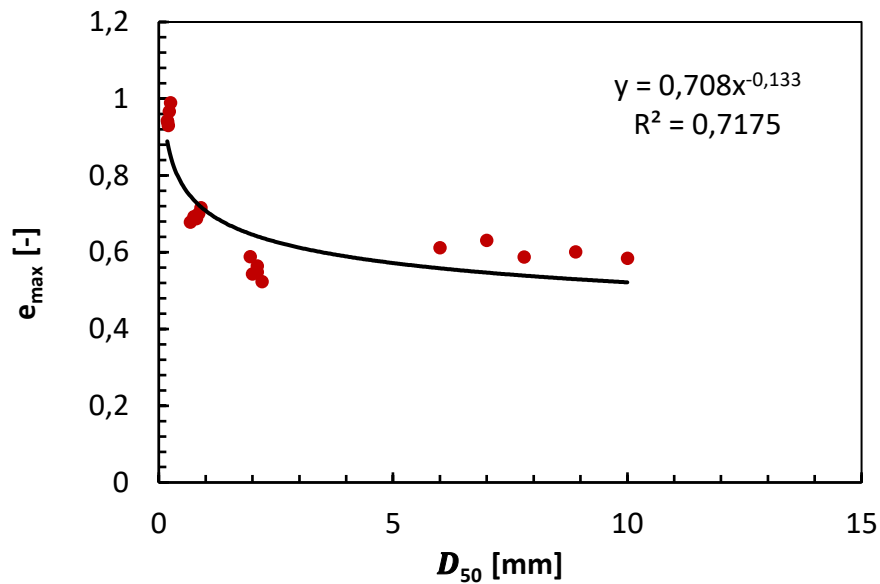


Figura 16. e_{\max} vs D_{50}

Nota: Correlación entre el diámetro por el que pasan el 50% de las partículas (D_{50}) y la relación de vacíos máxima., por J. Barros, 2018.

$$e_{\max} = 0.708D_{50}^{-0.133} \quad (19)$$

Donde:

D_{50} Es el diámetro por el que pasa el 50% de las partículas en milímetros.

Los resultados obtenidos para ambas correlaciones presentan coeficientes de determinación (R^2) mayores a 0.7, lo cual indican que el modelo propuesto explica bastante bien la variabilidad de los datos. Por otro lado, la tendencia encontrada es que entre mayor sea el tamaño de las partículas, menores serán las relaciones de vacíos máximas y mínimas. Esto se puede entender ya que, al tener partículas de tamaños muy grandes, no se tienen tantos vacíos como cuando se

tienen muchas partículas pequeñas que al juntarse forman el tamaño de la partícula grande (Patra, Sivakugan, Das, & Rout, 2010).

La estructura de las ecuaciones 18 y 19 son similar a la de la mayoría de las reportadas en la literatura especializada. Sin embargo, sufren de una gran debilidad que es la que se pretende solucionar en esta investigación y es que al depender de únicamente un diámetro de partículas, como lo es el D_{50} , no explican la variabilidad granulométrica del material. Por ejemplo, en esta investigación se hicieron cuatro grupos de 5 ensayos del material granular. En cada uno de los grupos, el valor de D_{50} es aproximadamente igual, pero los valores de e_{max} y e_{min} son completamente diferentes. Ante esto se propone desarrollar una ecuación que tenga en cuenta más variables granulométricas. La estructura de la ecuación propuesta es la que se aprecia en la ecuación 20 y 22:

$$e_{max} = k_1 D_{10}^{k_2} D_{30}^{k_3} D_{60}^{k_4} \quad (20)$$

Para calibrar esta ecuación, se emplea una regresión logarítmica de la siguiente manera:

$$y = k_1 x_1^{k_2} x_2^{k_3} x_3^{k_4}$$

Aplicando logaritmo natural en ambos lados se obtiene:

$$\ln(y) = \ln(k_1 x_1^{k_2} x_2^{k_3} x_3^{k_4})$$

Aplicando propiedades de los logaritmos, se puede reescribir la ecuación como:

$$\ln(y) = \ln(k_1) + \ln(x_1^{k_2}) + \ln(x_2^{k_3}) + \ln(x_3^{k_4})$$

$$\ln(y) = \ln(k_1) + k_2 \ln(x_1) + k_3 \ln(x_2) + k_4 \ln(x_3)$$

De esta forma, es aplicable una regresión lineal a los logaritmos. Realizando la regresión, se obtienen los resultados que se presentan en la Tabla 10 y la Tabla 12.

Tabla 10.

Resultados de la tabla ANOVA del análisis estadístico de la relación de vacíos máxima.

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.95
Coefficiente de determinación R ²	0.90
R ² ajustado	0.88
Error típico	0.08
Observaciones	20

<i>Análisis de varianza</i>					
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	3	0.783	0.261	45.595	0.000
Residuos	16	0.092	0.006		
Total	19	0.875			

	<i>Coefficiente</i>	<i>Error</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probab</i>	<i>Inferior</i>	<i>Superio</i>
	<i>s</i>	<i>típico</i>		<i>ilidad</i>	<i>95%</i>	<i>r 95%</i>

Intercepción	-0.367	0.073	-5.005	0.000	-0.523	-0.212
Variable X ₁	-0.141	0.051	-2.779	0.013	-0.249	-0.034
Variable X ₂	0.193	0.054	3.565	0.003	0.078	0.307
Variable X ₃	-0.234	0.033	-7.158	0.000	-0.303	-0.164

Nota: Regresión lineal para los datos obtenidos, por J. Barros, 2018.

De la Tabla 10 se puede concluir que existe una fuerte correlación lineal entre ambas variables ($R=0.95$) y que el modelo propuesto explica muy bien la variabilidad de los datos ($R^2=0.90$). Por otro lado, en el análisis de varianzas se hicieron las pruebas de hipótesis para cada de una de las variables que:

$$H_0: x_i = 0$$

$$H_1: x_i \neq 0$$

Los valores de la probabilidad obtenidos para las 4 pruebas de hipótesis son menores a 0.05, lo cual permite rechazar la hipótesis nula y se concluye que a un nivel de confianza del 95%, las cuatro constantes calibradas son diferentes a 0. Para obtener el valor de k_1 , se debe aplicar exponencial (para despejar el logaritmo natural de la regresión planteada). Los valores de k_2, k_3 y k_4 si se obtienen directamente de la Tabla 10. La Tabla 11 resume las constantes definitivas para la ecuación planteada.

Tabla 11.

Resultados de las constantes de calibración para la relación de vacíos máxima.

Variable	Valor
----------	-------

k_1	0.693
k_2	-0.141
k_3	0.193
k_4	-0.234

Nota: Constantes obtenidas de la tabla 10, por J. Barros, 2018.

De esta manera, la ecuación se puede reescribir como:

$$e_{max} = 0.693 D_{10}^{-0.141} D_{30}^{0.193} D_{60}^{-0.264} \quad (21)$$

Donde:

D_{10} es el diámetro por el que pasa el 10% de las partículas en milímetros.

D_{30} es el diámetro por el que pasa el 30% de las partículas en milímetros.

D_{60} es el diámetro por el que pasa el 60% de las partículas en milímetros.

Para la relación de vacíos mínima, se realiza un procedimiento análogo al presentado para la relación de vacíos máxima.

$$e_{min} = k_5 D_{10}^{k_6} D_{30}^{k_7} D_{60}^{k_8} \quad (22)$$

Tabla 12.

Resultados de la tabla ANOVA del análisis estadístico de la relación de vacíos mínima.

<i>Estadísticas de la</i>
<i>regresión</i>

Coeficiente de correlación múltiple	0.97
Coeficiente de determinación R^2	0.93
R^2 ajustado	0.92
Error típico	0.06
Observaciones	20

Análisis de varianza

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	3	0.861	0.287	73.058	0.000
Residuos	16	0.063	0.004		
Total	19	0.924			

	<i>Coeficiente s</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	-0.752	0.061	-12.374	0.000	-0.881	-0.623
Variable X_1	-0.142	0.042	-3.368	0.004	-0.231	-0.053
Variable X_2	0.171	0.045	3.827	0.001	0.076	0.266
Variable X_3	-0.226	0.027	-8.374	0.000	-0.284	-0.169

Nota: Regresión lineal de los datos obtenidos, por J. Barros, 2018.

De la Tabla 12 se puede concluir que existe una fuerte correlación lineal entre ambas variables ($R=0.97$) y que el modelo propuesto explica muy bien la variabilidad de los datos

($R^2=0.93$). Por otro lado, en el análisis de varianzas se hicieron las pruebas de hipótesis para cada de una de las variables que:

$$H_0: x_i = 0$$

$$H_1: x_i \neq 0$$

Los valores de la probabilidad obtenidos para las 4 pruebas de hipótesis son menores a 0.05, lo cual permite rechazar la hipótesis nula y se concluye que a un nivel de confianza del 95%, las cuatro constantes calibradas son diferentes a 0. Para obtener el valor de k_1 , se debe aplicar exponencial (para despejar el logaritmo natural de la regresión planteada). Los valores de k_2, k_3 y k_4 si se obtienen directamente de la Tabla 12. La Tabla 13 resume las constantes definitivas para la ecuación planteada.

Tabla 13.

Resultados de las constantes de calibración para la relación de vacíos mínima.

Variable	Valor
k_5	0.471
k_6	-0.142
k_7	0.171
k_8	-0.226

Nota: Constantes obtenidas de la tabla 12, por J. Barros, 2018.

De esta manera, la ecuación se puede reescribir como:

$$e_{min} = 0.471 D_{10}^{-0.142} D_{30}^{0.171} D_{60}^{-0.226} \quad (23)$$

Donde:

D_{10} es el diámetro por el que pasa el 10% de las partículas en milímetros.

D_{30} es el diámetro por el que pasa el 30% de las partículas en milímetros.

D_{60} es el diámetro por el que pasa el 60% de las partículas en milímetros.

La Figura 17 y la Figura 18 presentan las comparaciones de las relaciones de vacíos máximas y mínimas medidas y calculadas. Se observa que las predicciones son muy buenas.

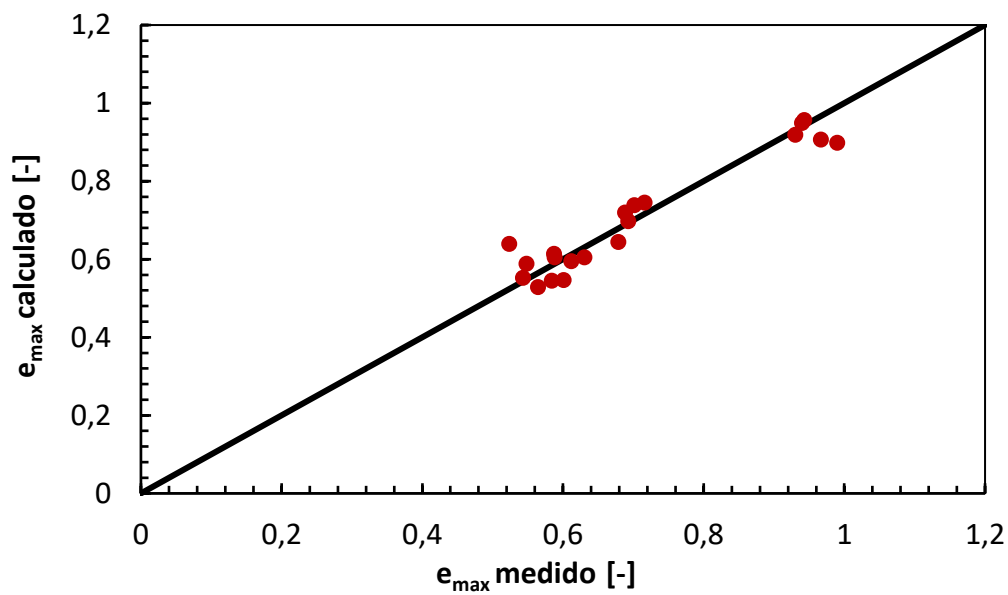


Figura 17. Comparación de la relación de vacíos máxima medida y calculada.

Nota: De los datos tomados en el laboratorio, por J. Barros, 2018.

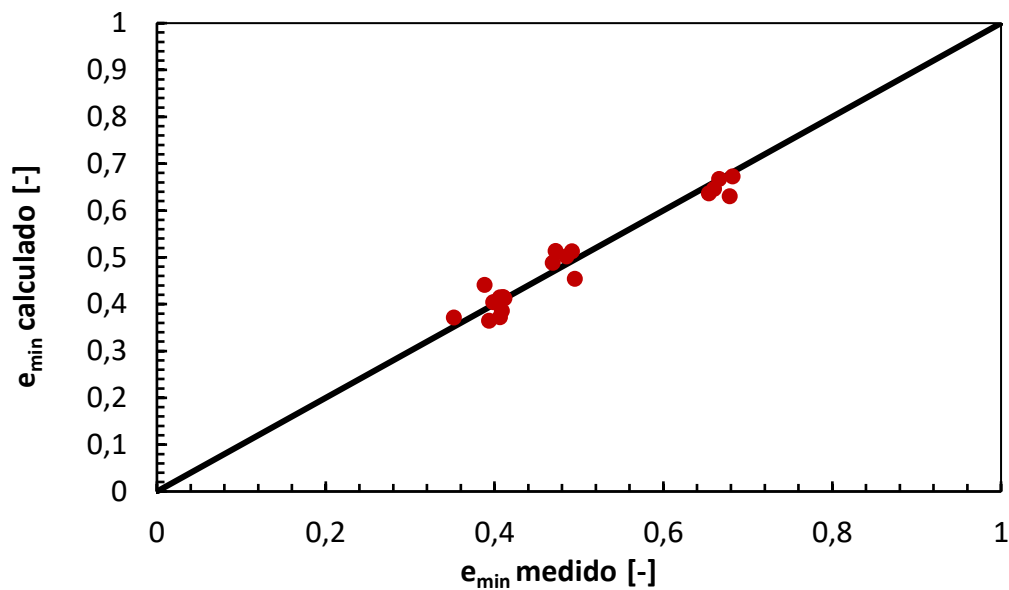


Figura 18. Comparación de la relación de vacíos mínima medida y calculada.

Nota: De los datos tomados en el laboratorio, por J. Barros, 2018.

Adicionalmente, se propone una correlación lineal entre la relación de vacíos máxima y mínima. El resultado de esta correlación se presenta en la Figura 19 y la ecuación 24:

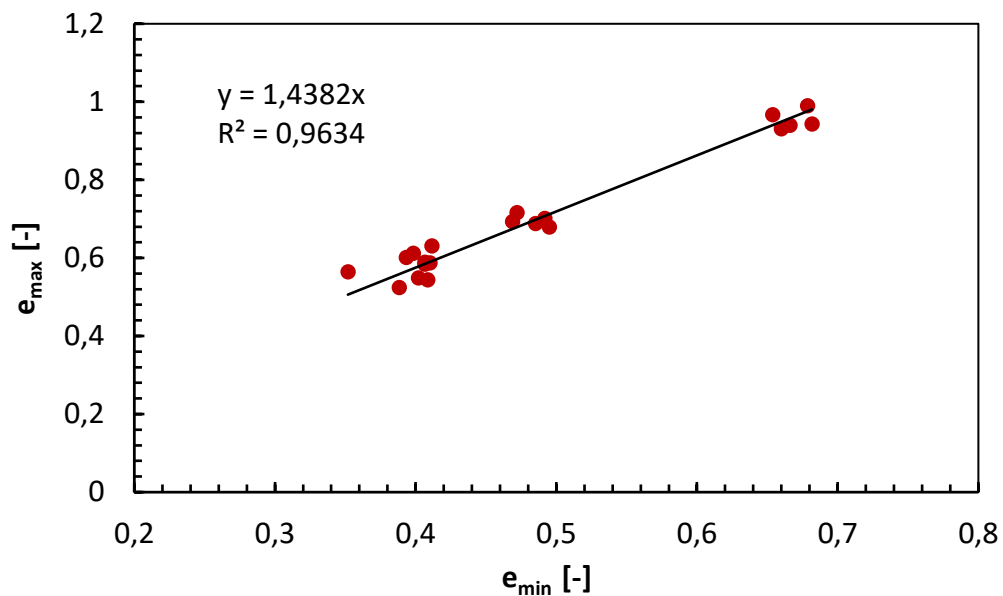


Figura 19. Correlación lineal entre relación de vacíos máxima y mínima.

Nota: Se relaciona E_{max} vs E_{min} y se determina el modelo matemático por medio de la tendencia, por J. Barros, 2018.

$$e_{max} = 1.4383e_{min} \quad (24)$$

5.2. Análisis estadístico para una base de datos reportados en la literatura

En esta sección se describen las correlaciones planteadas para los 20 ensayos realizados durante esta investigación y datos de relaciones de vacíos y características granulométricas presentadas en más de 15 investigaciones realizadas por diversos autores y que están disponibles en la literatura especializada. En total se implementaron 76 datos de relaciones de vacíos máximas y mínimas y parámetros granulométricos, los cuales se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14.

Resumen de las características granulométricas y de relaciones de vacíos máximas y mínimas para los 76 datos analizados.

	$D_{10} (mm)$	$D_{30} (mm)$	$D_{60} (mm)$	$e_{max} (-)$	$e_{min} (-)$	Ref.
G1	0.190	1.300	8.900	0.601	0.393	Esta investigación
G2	0.180	2.000	14.000	0.584	0.406	
G3	0.150	2.000	10.000	0.630	0.412	
G4	0.200	3.000	11.000	0.587	0.410	
G5	0.300	2.200	7.600	0.612	0.398	
G6	0.190	0.800	3.200	0.524	0.388	

G7	0.150	0.540	5.000	0.543	0.409	
G8	0.450	1.000	2.900	0.588	0.406	
G9	0.290	0.900	3.900	0.548	0.402	
G10	0.140	0.420	5.100	0.564	0.352	
G11	0.220	0.600	1.200	0.716	0.472	
G12	0.120	0.300	1.300	0.693	0.469	
G13	0.150	0.410	1.150	0.701	0.492	
G14	0.110	0.240	1.600	0.678	0.495	
G15	0.130	0.340	1.200	0.688	0.485	
G16	0.090	0.130	0.200	0.943	0.682	
G17	0.090	0.140	0.220	0.940	0.666	
G18	0.092	0.140	0.250	0.930	0.660	
G19	0.095	0.160	0.290	0.967	0.654	
G20	0.098	0.170	0.310	0.990	0.679	
G21	0.130	0.190	0.210	0.805	0.550	(Salgado & badini,
G22	0.088	0.120	0.180	0.865	0.580	2000)
G23	0.120	0.220	0.400	0.966	0.584	(Takeji, 2000)
G24	0.250	0.500	1.200	0.567	0.334	
G25	0.120	0.150	0.180	0.992	0.679	(Wichtmann,
G26	0.190	0.280	0.380	0.930	0.630	2005)
G27	0.290	0.470	0.600	0.874	0.577	
G28	0.160	0.280	0.680	0.691	0.422	
G29	0.210	0.460	0.810	0.620	0.380	(Simoni &
G30	0.320	0.800	3.640	0.470	0.250	Houlsby, 2006)

						(Bandini &
G31	0.200	0.310	0.410	0.740	0.680	Salthiskumar,
						2009)
G32	0.345	0.484	0.790	0.791	0.504	(Patra, Sivakugan,
G33	0.329	0.421	0.700	0.775	0.512	& Das, 2010)
G34	0.325	0.405	0.680	0.771	0.510	
G35	0.286	0.363	0.440	0.888	0.597	
G36	0.292	0.355	0.420	0.906	0.619	
G37	0.335	0.427	0.610	0.890	0.577	
G38	0.570	0.544	0.810	0.703	0.389	
G39	0.200	0.324	0.410	0.766	0.484	
G40	0.335	0.423	0.650	0.841	0.555	
G41	0.226	0.308	0.400	0.844	0.552	
G42	0.236	0.308	0.390	0.827	0.577	
G43	0.251	0.336	0.420	0.803	0.544	
G44	0.224	0.273	0.390	0.801	0.544	
G45	0.310	0.401	0.700	0.732	0.483	
G46	0.200	0.320	0.410	0.761	0.516	
G47	0.242	0.327	0.390	0.842	0.569	
G48	0.217	0.325	0.390	0.853	0.566	
G49	0.200	0.300	0.370	0.919	0.633	
G50	0.224	0.292	0.360	0.919	0.625	
G51	0.242	0.337	0.400	0.857	0.562	
G52	0.248	0.317	0.390	0.861	0.567	

G53	0.220	0.300	0.390	0.729	0.457	
G54	0.245	0.337	0.460	0.710	0.468	
G55	0.230	0.289	0.400	0.757	0.512	
G56	0.190	0.290	0.390	0.843	0.542	
G57	0.248	0.359	2.000	0.480	0.268	
G58	0.199	0.259	0.650	0.578	0.356	
G59	0.440	0.689	2.000	0.583	0.278	
G60	0.270	0.382	1.200	0.545	0.315	
G61	0.410	0.914	2.000	0.548	0.292	
G62	0.297	0.395	0.890	0.551	0.346	
G63	0.342	0.541	1.900	0.492	0.261	
G64	0.388	0.875	1.700	0.590	0.302	
G65	0.300	0.484	1.500	0.524	0.288	
G66	0.410	0.970	1.500	0.621	0.331	
G67	0.382	0.967	1.450	0.621	0.335	
G68	0.350	0.840	1.400	0.618	0.341	
G69	0.319	0.681	1.400	0.607	0.330	
G70	0.227	0.300	0.450	0.770	0.490	(Ahmed & Mostefa, 2012)
G71	0.120	0.180	0.235	0.850	0.540	(Bablu & Maheshwari, 2013)
G72	0.070	0.300	0.700	0.704	0.536	(Mahmoudi, Cherif, Belkhatir,

						Arab, & Schanz, 2014)
G73	0.350	0.550	0.820	0.844	0.519	(Mohamed, Hanifi, & Karim, 2015)
G74	0.130	0.290	0.600	0.791	0.461	(Witchmann & Triantafyllidis, 2016)
G75	0.090	0.140	0.150	1.054	0.677	(Pham Huu, 2017)
G76	0.130	0.150	0.180	0.930	0.581	

Nota: Recopilación de información tomada por la literatura, por J. Barros, 2018.

Cabe resaltar que para el cálculo con la ecuación propuesta se debe tener en cuenta un rango de validez que se presenta a continuación.

Tabla 15.

Rangos de variables utilizadas para la estimación de las relaciones de vacíos máximas y mínimas.

	<i>D10</i> (mm)	<i>D30</i> (mm)	<i>D60</i> (mm)	<i>e_{max}</i> (-)	<i>e_{min}</i> (-)
Mínimo Valor	0.070	0.120	0.150	0.470	0.250
Máximo valor	0.570	3.000	14.000	1.054	0.682
Rango	0.500	2.880	13.850	0.584	0.432
Número de muestras	76	76	76	76	76

Nota: Rango de validez de la muestra para calcular con la ecuación propuesta, analizado de las 76 muestras, por J. Barros, 2018.

La estructura de la ecuación propuesta es igual a la analizada en la sección 6.1.

$$e_{max} = k_1 D_{10}^{k_2} D_{30}^{k_3} D_{60}^{k_4} \quad (25)$$

Para calibrar esta ecuación, se linealiza igual que en la sección anterior:

$$\ln(y) = \ln(k_1) + k_2 \ln(x_1) + k_3 \ln(x_2) + k_4 \ln(x_3)$$

De esta forma, es aplicable una regresión lineal a los logaritmos. Realizando la regresión, se obtienen los resultados que se presentan en la Tabla 16 y la Tabla 18.

Tabla 16.

Resultados de la tabla ANOVA del análisis estadístico de la relación de vacíos máxima.

<i>Estadísticas de la regresión</i>					
Coeficiente de correlación múltiple	0.86				
Coeficiente de determinación R^2	0.75				
R^2 ajustado	0.74				
Error típico	0.11				
Observaciones	76				
<i>Análisis de varianza</i>					
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	3	2.377	0.792	70.693	0.000
Residuos	72	0.807	0.011		
Total	75	3.184			
	<i>Coeficiente s</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i> <i>Superior 95%</i>

Intercepción	-0.420	0.041	-10.161	0.000	-0.503	-0.338
Variable X ₁	-0.180	0.038	-4.787	0.000	-0.255	-0.105
Variable X ₂	0.263	0.052	5.035	0.000	0.159	0.367
Variable X ₃	-0.277	0.029	-9.575	0.000	-0.335	-0.220

Nota: Regresión lineal de los datos obtenidos de la literatura, por J. Barros, 2018.

De la Tabla 10 se puede concluir que existe una fuerte correlación lineal entre ambas variables ($R=0.86$) y que el modelo propuesto explica muy bien la variabilidad de los datos ($R^2=0.75$). Por otro lado, en el análisis de varianzas se hicieron las pruebas de hipótesis para cada de una de las variables que:

$$H_0: x_i = 0$$

$$H_1: x_i \neq 0$$

Los valores de la probabilidad obtenidos para las 4 pruebas de hipótesis son menores a 0.05, lo cual permite rechazar la hipótesis nula y se concluye que a un nivel de confianza del 95%, las cuatro constantes calibradas son diferentes a 0. Para obtener el valor de k_1 , se debe aplicar exponencial (para despejar el logaritmo natural de la regresión planteada). Los valores de k_2, k_3 y k_4 si se obtienen directamente de la Tabla 16. La Tabla 17 resume las constantes definitivas para la ecuación planteada.

Tabla 17.

Resultados de las constantes de calibración para la relación de vacíos máxima.

Variable	Valor
k_1	0.657

$$k_2 \quad -0.180$$

$$k_3 \quad 0.263$$

$$k_4 \quad -0.277$$

Nota: Constantes obtenidas de la tabla 15, por J. Barros, 2018.

De esta manera, la ecuación se puede reescribir como:

$$e_{max} = 0.657 D_{10}^{-0.180} D_{30}^{0.263} D_{60}^{-0.277} \quad (26)$$

Donde:

D_{10} es el diámetro por el que pasa el 10% de las partículas en milímetros.

D_{30} es el diámetro por el que pasa el 30% de las partículas en milímetros.

D_{60} es el diámetro por el que pasa el 60% de las partículas en milímetros.

Para la relación de vacíos mínima, se realiza un procedimiento análogo al presentado para la relación de vacíos máxima

$$e_{min} = k_5 D_{10}^{k_6} D_{30}^{k_7} D_{60}^{k_8} \quad (27)$$

Tabla 18.

Resultados de la tabla ANOVA del análisis estadístico de la relación de vacíos mínima.

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.80
Coefficiente de determinación R ²	0.65
R ² ajustado	0.63
Error típico	0.16
Observaciones	76

<i>Análisis de varianza</i>					
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	3	3.451	1.150	43.656	0.000
Residuos	72	1.897	0.026		
Total	75	5.349			

	<i>Coefficiente s</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	-1.007	0.063	-15.884	0.000	-1.134	-0.881
Variable X ₁	-0.322	0.058	-5.596	0.000	-0.438	-0.208
Variable X ₂	0.353	0.080	4.409	0.000	0.193	0.512

Variable X_3	-0.323	0.044	-7.272	0.000	-0.412	-0.235
----------------	--------	-------	--------	-------	--------	--------

Nota: Regresión lineal de los datos obtenidos de la literatura, por J. Barros, 2018.

De la Tabla 12 se puede concluir que existe una fuerte correlación lineal entre ambas variables ($R=0.80$) y que el modelo propuesto explica bien la variabilidad de los datos ($R^2=0.65$). Por otro lado, en el análisis de varianzas se hicieron las pruebas de hipótesis para cada de una de las variables que:

$$H_0: x_i = 0$$

$$H_1: x_i \neq 0$$

Los valores de la probabilidad obtenidos para las 4 pruebas de hipótesis son menores a 0.05, lo cual permite rechazar la hipótesis nula y se concluye que a un nivel de confianza del 95%, las cuatro constantes calibradas son diferentes a 0. Para obtener el valor de k_1 , se debe aplicar exponencial (para despejar el logaritmo natural de la regresión planteada). Los valores de k_2, k_3 y k_4 si se obtienen directamente de la Tabla 18. La Tabla 19 resume las constantes definitivas para la ecuación planteada.

Tabla 19.

Resultados de las constantes de calibración para la relación de vacíos mínima.

Variable	Valor
k_5	0.365
k_6	-0.322
k_7	0.353
k_8	-0.323

Nota: Constantes obtenidas de la tabla 17, por J. Barros, 2018.

De esta manera, la ecuación se puede reescribir como:

$$e_{min} = 0.365 D_{10}^{-0.322} D_{30}^{0.353} D_{60}^{-0.323} \quad (28)$$

Donde:

D_{10} es el diámetro por el que pasa el 10% de las partículas en milímetros.

D_{30} es el diámetro por el que pasa el 30% de las partículas en milímetros.

D_{60} es el diámetro por el que pasa el 60% de las partículas en milímetros.

La Figura 20 y la Figura 21 presentan las comparaciones de las relaciones de vacíos máximas y mínimas medidas y calculadas. Se observa que las predicciones son muy buenas.

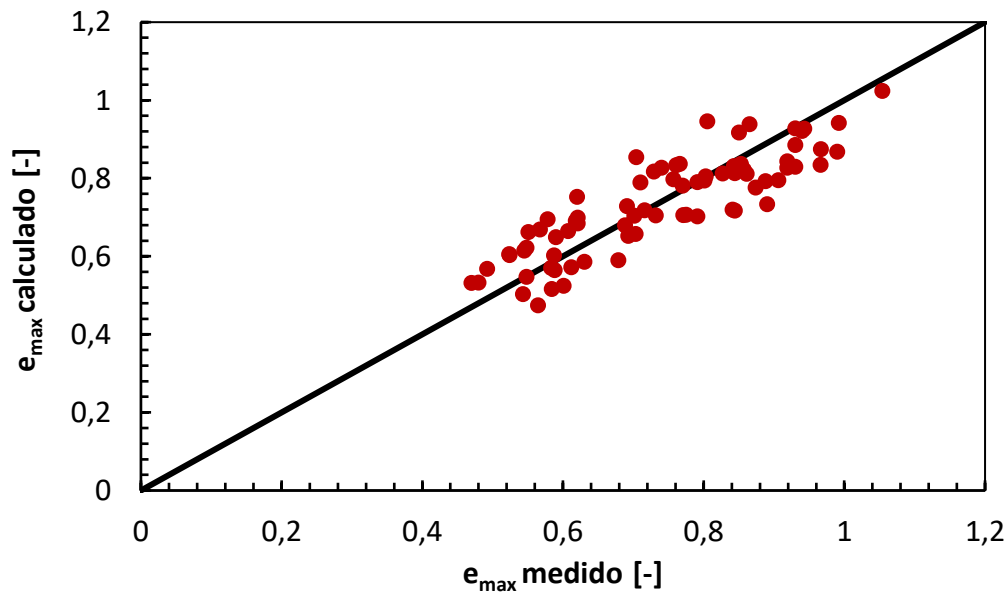


Figura 20. Comparación de la relación de vacíos máxima medida y calculada.

Nota: De los datos tomados en la literatura, por J. Barros, 2018.

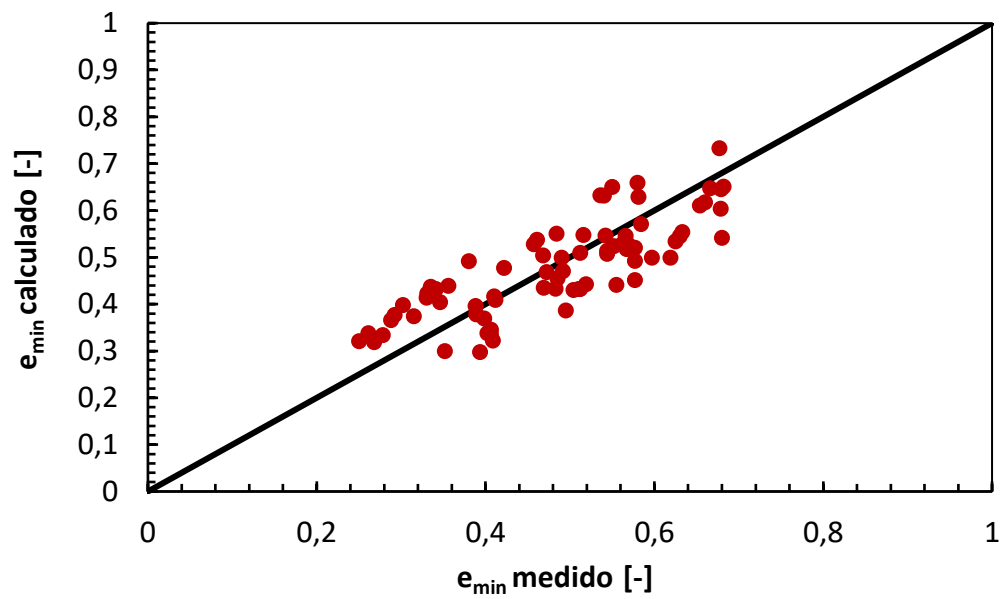


Figura 21. Comparación de la relación de vacíos mínima medida y calculada.
Nota: De los datos tomados en la literatura, por J. Barros, 2018.

Adicionalmente, se propone una correlación lineal entre la relación de vacíos máxima y mínima.

El resultado de esta correlación se presenta en la Figura 22 y la ecuación 29:

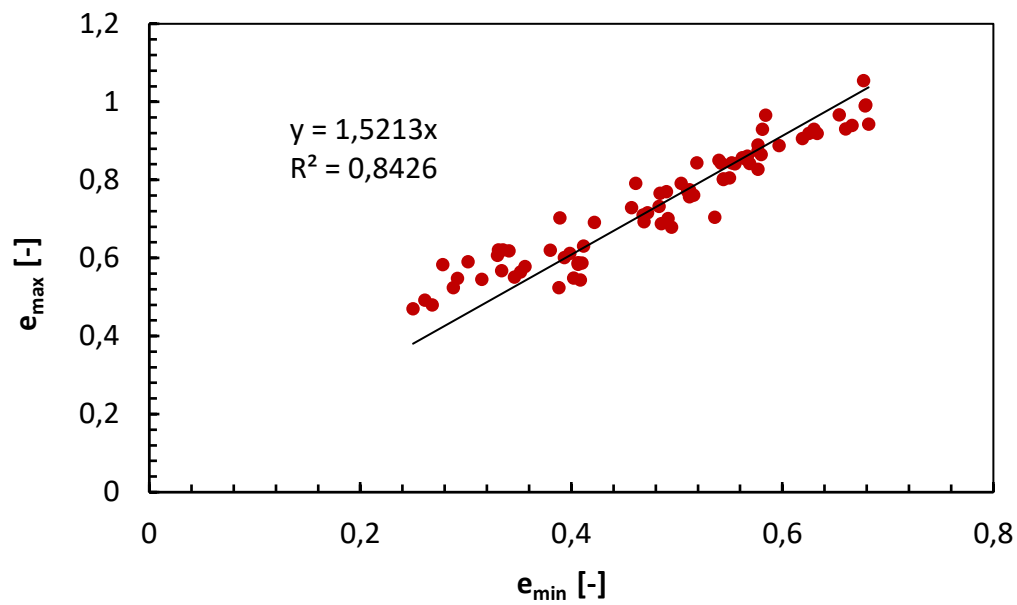


Figura 22. Correlación lineal entre relación de vacíos máxima y mínima.

Nota: Se relaciona E_{\max} vs E_{\min} y se determina el modelo matemático por medio de la tendencia, por J. Barros, 2018.

$$e_{\max} = 1.5213e_{\min} \quad (29)$$

6. Conclusiones

En esta investigación se desarrollaron análisis experimentales y estadísticos acerca de la influencia de la granulometría en las relaciones de vacíos máximas y mínimas. Entre las principales conclusiones obtenidas se destacan:

- Se encontró una fuerte dependencia entre la distribución granulométrica de suelos granulares y sus relaciones de vacíos máximas y mínimas.
- Las ecuaciones desarrolladas entre las relaciones de vacíos máximas y mínimas con la granulometría presentan un buen ajuste, con un coeficiente de determinación (R^2) siempre mayor o igual a 0.65.
- Trabajos previos reportados en la literatura presentan correlaciones entre las características granulométricas de suelos granulares y sus relaciones de vacíos máximas y mínimas basados únicamente en el diámetro promedio de partículas D_{50} , este parámetro no puede capturar toda la variabilidad granulométrica del suelo. Por tal razón, las ecuaciones desarrolladas en esta investigación incluyen tres parámetros comunes que son D_{10} , D_{30} , D_{60} , los cuales captan mejor la variabilidad granulométrica del suelo.
- Existe una fuerte relación entre la relación de vacíos máxima y la relación de vacíos mínima de suelos granulares ($e_{max} \approx 1.52e_{min}$). Este resultado es similar a lo encontrado por (Miura, Maeda, Furukawa, & Toki, 1997) y (Cubrinovski & Ishihara, 2002).
- Las relaciones de vacíos máximas y mínimas decrecen con el tamaño de partículas. Esto tiene sentido considerando que para llenar el volumen de partículas de gran

tamaño, se necesitan más partículas de menor tamaño, dentro de las cuales se presentaran vacíos de aire, lo que genera relaciones de vacíos mayores.

7. Limitaciones

Los análisis presentados en esta investigación fueron basados en resultados experimentales propios y resultados reportados en la literatura para diferentes tipos de suelos granulares, por lo que se considera que la ecuación es aplicable a cualquier tipo de suelo granular siempre y cuando su contenido de finos sea menor al 15% y que el tamaño de sus partículas no sea mayor a 2” puesto que estas dos condiciones no fueron analizadas durante esta investigación. En el futuro se deben realizar investigaciones similares a esta para el caso de suelos finos.

Además, es necesario tener en cuenta que al ser regresiones estadísticas solo son aplicables en el rango de las variables analizadas, es decir, la extrapolación a rangos por fuera de las variables presentadas no es válida. Estos rangos se pueden apreciar en la Tabla 15.

8. Referencias

- Aberg, B. (1992). Void ratio of noncohesive soils and similar materials. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 118(9), 1315-1334.
- Aberg, B. (1996). Grain-size distribution for smallest possible void ratio. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 122(1), 74-77.
- Ahmed, A., & Mostefa, B. (2012). Fines content and cyclic preloading effect on liquefaction potential of silty sand: A laboratory study. *Polytechnica Hungarica*, 9(4), 47-64.
- Amini, F., & Qi, G. (2000). Liquefaction Testing of Stratified Silty Sands. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 3, 208-217.
- Bablu, K., & Maheshwari, B. (2013). Effects of silt content on dynamic properties of solani sand. *Seventh International Conference on Case*, 1-7.
- Bandini, P., & Salthiskumar, S. (2009). Effects of silt content and void ratio on the saturated hydraulic conductivity and compressibility of sand-silt mixtures. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 135, 1976-1980.
- Barton, M., Cresswell, A., & Brown, R. (2001). Measuring the effect of mixed grading on the maximum dry density of sands. *Geotechnical Testing Journal*, 24(1), 121-127.
- Braja, M. D. (2013). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Mexico: Cengage Learning.
- Ching, S., Jia-Yi, W., & Louis, G. (2015). Modeling of minimum void ratio for sand-silt mixtures. *Elsevier*, 293-304.
- Ching, S., Jia-Yi, W., & Louis, G. (2016). Maximum and minimum void ratios for sand-silt mixtures. *Elsevier*, 7-18.
- Ching, S., Yibing, D., & Mehrashk, M. (2018). A multi-variable equation for relationship between limiting void ratios of uniform sands and morphological characteristics of their particles. *Engineering Geology*, 237, 21-31.
- Cho, G., Dodds, J., & Santamarina, J. (2006). Particle shape effects on packing density,. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132, 591-602.
- D4253, A. (2016). Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table. *ASTM international*, 1-14.
- D4254. (2016). Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density. *ASTM international*, 1-9.
- Das, C. (2008). Weight-Volume Relationships. *CE 240 Soil Mechanics & Foundations*.
- Lade, P., Liggio, J., & Yamamuro, J. (1998). Effects of non-plastic fines on minimum and maximum void ratios of sand. *Geotechnical Testing Journal*, 21(4), 336-347.

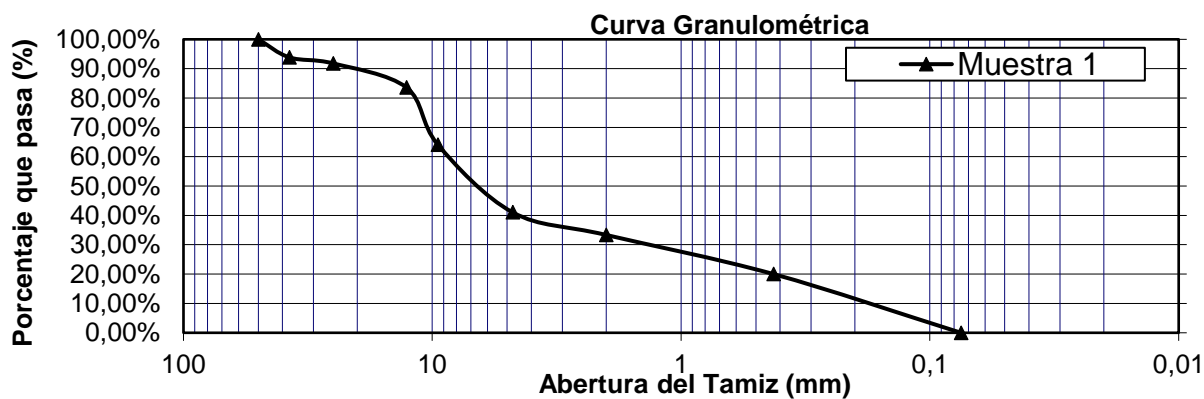
- Leoni, A. (2005). *Propiedades físicas de los suelos*. Argentina.
- Mahmoudi, Y., Cherif, T., Belkhatir, M., Arab, A., & Schanz, T. (2014). Influence of the equivalent intergranular void ratio on shear strength of sand-silt mixtures. *Comptes Rendus Mécanique*.
- Misko, C., & Kenji, I. (2002). Maximum and minimum void ratio characteristics of sands. *Soils and Foundations*, 42, 65-78.
- Mohamed, B., Hanifi, M., & Karim, B. (2015). Critical undrained shear strength of loose-medium sand-silt mixtures under monotonic loadings. *Journal of theoretical and applied mechanics*, 53(2), 331-344.
- Patra, C. B., Nagaratnam, S., & Shuvranshu, R. (2010). Correlations for relative density of clean sand with median grain size and compaction energy. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 4, 195-203.
- Patra, C., Sivakugan, N., & Das, B. (2010). Relative density and mean grain-size correlation from laboratory compaction test on granular soil. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 4, 55-62.
- Patra, C., Sivakugan, N., Das, B., & Rout, S. (2010). Relative density and mean grain-size correlation from laboratory compaction test on granular soil. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 4, 55-62.
- Pham Huu, G. (2017). Effects of particle characteristics on the shear strength of calcareous sand. *Geotechnica Slovenica*, 77-89.
- Riquelme, J., & Dorador, L. (2014). Metodología para determinar densidades máxima y mínima en suelos granulares gruesos a partir de ensayos de laboratorio de escala reducida. *Chilean Geotechnical Society*, 1-11.
- Rouse, P., Fannin, R., & Shuttle, D. (2008). Influence of roundness on the void ratio and strength of uniform sand. *Géotechnique*, 58, 227-231.
- Salgado, R., & badini, P. K. (2000). Shear strength and stiffness of silty sand. *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(5), 53-64.
- Santamarina, J., & Cho, G. (2004). Soil behaviour: the role of particle shape. *Jardine*.
- Shimobe, S., & Moroto, N. (1995). A new classification chart for sand liquefaction. *Proc. 1st Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering*, 315-320.
- Simoni, A., & Houlsby, G. (2006). The direct shear strength and dilatancy of sand-gravel mixtures. *Geotechnical and geological engineering*, 24, 523-549.
- Takeji, K. (2000). Correlation of pore-pressure B-value with P-wave velocity and poisson's ratio for imperfectly saturated sand or gravel. *Soils and foundations*, 40(4), 95-102.

- Wichtmann, T. (2005). Explicit accumulation model for non-cohesive soils under cyclic loading. *Bochum*, 1-288.
- Witchmann, T., & Triantafyllidis, T. (2016). An experimental data base for the development, calibration and verification of constitutive models for sand with focus to cyclic loading. Part I: test with monotonic loading and stress cycles. *Acta Geotechnica*, 11(4), 739-761.
- Yilmaz, Y., Mollamahmutoglu, M., Ozaydin, V., & Kayabali, K. (2009). A study on the limit void ratio characteristics of medium to fine mixed graded sands. *Engineering Geology*, 104, 290-294.
- Youd, T. (1973). Factors controlling maximum and minimum densities of sands. *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 98-112.

Anexos

Muestra No.	Muestra 1	Norma de referencia:	ASTM D422
-------------	-----------	----------------------	-----------

Descripción de la muestra:			Material de recebo granular para subbase de pavimentos rígidos.		
Peso de la muestra seca inicial (g):			2300		
Peso de la muestra después de lavada y seca (g):			1950		
Resultados:					
Abertura del tamiz (mm)	Abertura del tamiz (ASTM D6913 - 17)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Ret. total	% Pasa total
50	2"	0	0.00%	0.00%	100.00%
37.50	1 1/2"	120	6.15%	6.15%	93.85%
25	1"	40	2.05%	8.21%	91.79%
12.7	1/2"	160	8.21%	16.41%	83.59%
9.50	3/8"	380	19.49%	35.90%	64.10%
4.75	No. 4	450	23.08%	58.97%	41.03%
2	No. 10	150	7.69%	66.67%	33.33%
0.425	No. 40	260	13.33%	80.00%	20.00%
0.075	No. 200	390	20.00%	100.00%	0.00%
FONDO	FONDO	0.0	0.00%	100.00%	
TOTAL		1950	100.00%	100.00%	
% Pasa Tamiz N° 200 (75 um) =		0.00%	Coeficiente de uniformidad		46.84
% Pasa Tamiz N° 10 (2 mm) =		33.33%	Coeficiente de gradación		1.00
D10 (mm)	0.19	D60 (mm)	8.90		
D30 (mm)	1.30	D80 (mm)	12.00		
D50 (mm)	6.90				

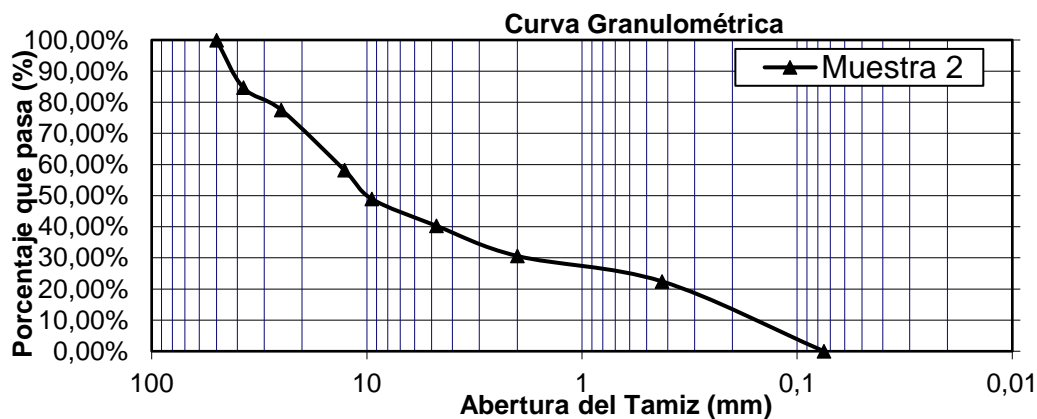


Anexo 1. Granulometría de la muestra N° 1.

Fuente: Elaboración propia.

Muestra No.	Muestra 2	Norma de referencia:	ASTM D422
--------------------	-----------	-----------------------------	-----------

Descripción de la muestra:			Material de recebo granular para subbase de pavimentos rígidos.		
Peso de la muestra seca inicial (g):			2300		
Peso de la muestra después de lavada y seca (g):			1960		
Resultados:					
Abertura del tamiz (mm)	Abertura del tamiz (ASTM D6913 - 17)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Ret. total	% Pasa total
50	2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
37.50	1 1/2"	300.0	15.31%	15.31%	84.69%
25	1"	140.0	7.14%	22.45%	77.55%
12.7	1/2"	380.0	19.39%	41.84%	58.16%
9.50	3/8"	180.0	9.18%	51.02%	48.98%
4.75	No. 4	170.0	8.67%	59.69%	40.31%
2	No. 10	190.0	9.69%	69.39%	30.61%
0.425	No. 40	160.0	8.16%	77.55%	22.45%
0.075	No. 200	440.0	22.45%	100.00%	0.00%
FONDO	FONDO	0.0	0.00%	100.00%	
TOTAL		1960	100.00%	100.00%	
% Pasa Tamiz N° 200 (75 um) =		0.00%	Coeficiente de uniformidad		77.78
% Pasa Tamiz N° 10 (2 mm) =		30.61%	Coeficiente de gradación		1.59
D10 (mm)	0.18	D60 (mm)	14.00		
D30 (mm)	2.00	D80 (mm)	30.00		
D50 (mm)	10.00				

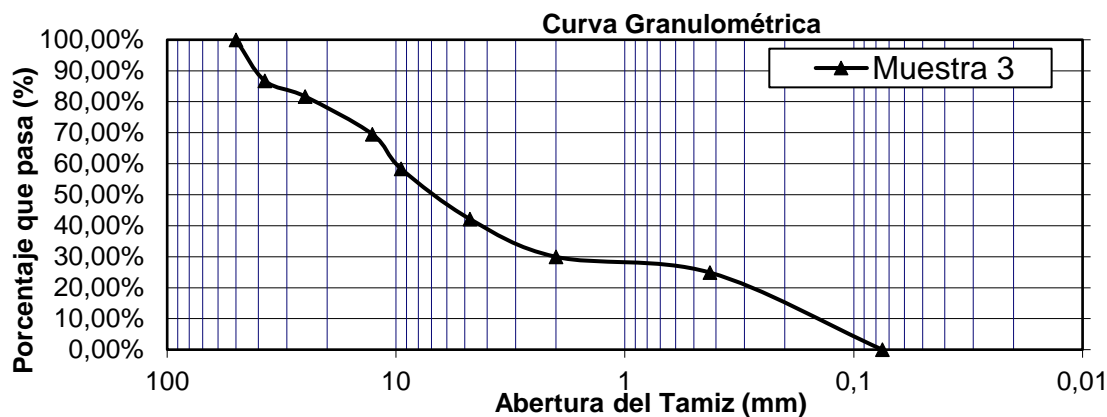


Anexo 2. Granulometría de la muestra N° 2.

Fuente: Elaboración propia.

Muestra No.	Muestra 3	Norma de referencia:	ASTM D422
--------------------	-----------	-----------------------------	-----------

Descripción de la muestra:			Material de recebo granular para subbase de pavimentos rígidos.		
Peso de la muestra seca inicial (g):			2300		
Peso de la muestra después de lavada y seca (g):			1970		
Resultados:					
Abertura del tamiz (mm)	Abertura del tamiz (ASTM D6913 - 17)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Ret. total	% Pasa total
50	2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
37.50	1 1/2"	260.0	13.20%	13.20%	86.80%
25	1"	100.0	5.08%	18.27%	81.73%
12.7	1/2"	240.0	12.18%	30.46%	69.54%
9.50	3/8"	220.0	11.17%	41.62%	58.38%
4.75	No. 4	320.0	16.24%	57.87%	42.13%
2	No. 10	240.0	12.18%	70.05%	29.95%
0.425	No. 40	100.0	5.08%	75.13%	24.87%
0.075	No. 200	490.0	24.87%	100.00%	0.00%
FONDO	FONDO	0.0	0.00%	100.00%	
TOTAL		1970	100.00%	100.00%	
% Pasa Tamiz N° 200 (75 um) =		0.00%	Coeficiente de uniformidad		66.67
% Pasa Tamiz N° 10 (2 mm) =		29.95%	Coeficiente de gradación		2.67
D10 (mm)	0.15	D60 (mm)	10.00		
D30 (mm)	2.00	D80 (mm)	22.00		
D50 (mm)	7.00				

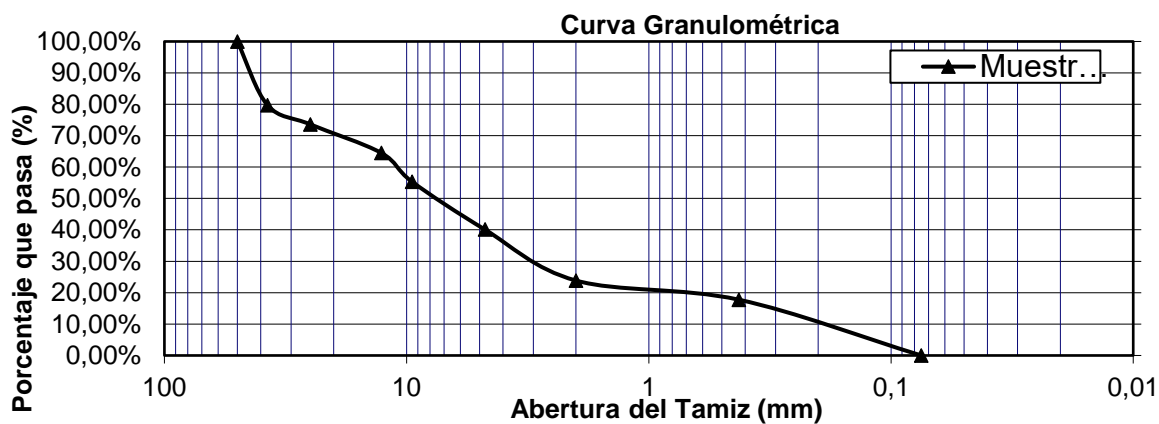


Anexo 3. Granulometría de la muestra N° 3.

Fuente: Elaboración propia.

Muestra No.	Muestra 4	Norma de referencia:	ASTM D422
--------------------	-----------	-----------------------------	-----------

Descripción de la muestra:			Material de recebo granular para subbase de pavimentos rígidos.		
Peso de la muestra seca inicial (g):			2300		
Peso de la muestra después de lavada y seca (g):			1970		
Resultados:					
Abertura del tamiz (mm)	Abertura del tamiz (ASTM D6913 - 17)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Ret. total	% Pasa total
50	2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
37.50	1 1/2"	400.0	20.30%	20.30%	79.70%
25	1"	120.0	6.09%	26.40%	73.60%
12.7	1/2"	180.0	9.14%	35.53%	64.47%
9.50	3/8"	180.0	9.14%	44.67%	55.33%
4.75	No. 4	300.0	15.23%	59.90%	40.10%
2	No. 10	320.0	16.24%	76.14%	23.86%
0.425	No. 40	120.0	6.09%	82.23%	17.77%
0.075	No. 200	350.0	17.77%	100.00%	0.00%
FONDO	FONDO	0.0	0.00%	100.00%	
TOTAL		1970	100.00%	100.00%	
% Pasa Tamiz N° 200 (75 um) =		0.00%	Coeficiente de uniformidad		55.00
% Pasa Tamiz N° 10 (2 mm) =		23.86%	Coeficiente de gradación		4.09
D10 (mm)	0.20	D60 (mm)	11.00		
D30 (mm)	3.00	D80 (mm)	39.00		
D50 (mm)	7.80				

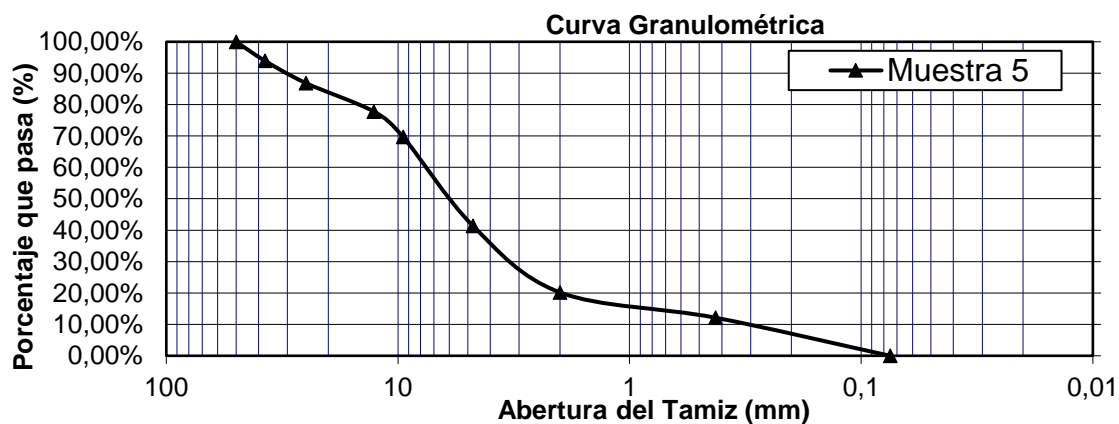


Anexo 4. Granulometría de la muestra N° 4.

Fuente: Elaboración propia.

Muestra No.	Muestra 5	Norma de referencia:	ASTM D422
--------------------	-----------	-----------------------------	-----------

Descripción de la muestra:			Material de recebo granular para subbase de pavimentos rígidos.		
Peso de la muestra seca inicial (g):			2300		
Peso de la muestra después de lavada y seca (g):			1980		
Resultados:					
Abertura del tamiz (mm)	Abertura del tamiz (ASTM D6913 - 17)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Ret. total	% Pasa total
50	2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
37.50	1 1/2"	120.0	6.06%	6.06%	93.94%
25	1"	140.0	7.07%	13.13%	86.87%
12.7	1/2"	180.0	9.09%	22.22%	77.78%
9.50	3/8"	160.0	8.08%	30.30%	69.70%
4.75	No. 4	560.0	28.28%	58.59%	41.41%
2	No. 10	420.0	21.21%	79.80%	20.20%
0.425	No. 40	160.0	8.08%	87.88%	12.12%
0.075	No. 200	240.0	12.12%	100.00%	0.00%
FONDO	FONDO	0.0	0.00%	100.00%	
TOTAL		1980	100.00%	100.00%	
% Pasa Tamiz N° 200 (75 um) =		0.00%	Coeficiente de uniformidad		25.33
% Pasa Tamiz N° 10 (2 mm) =		20.20%	Coeficiente de gradación		4.49
D10 (mm)	0.30	D60 (mm)	7.60		
D30 (mm)	3.20	D80 (mm)	16.00		
D50 (mm)	6.00				

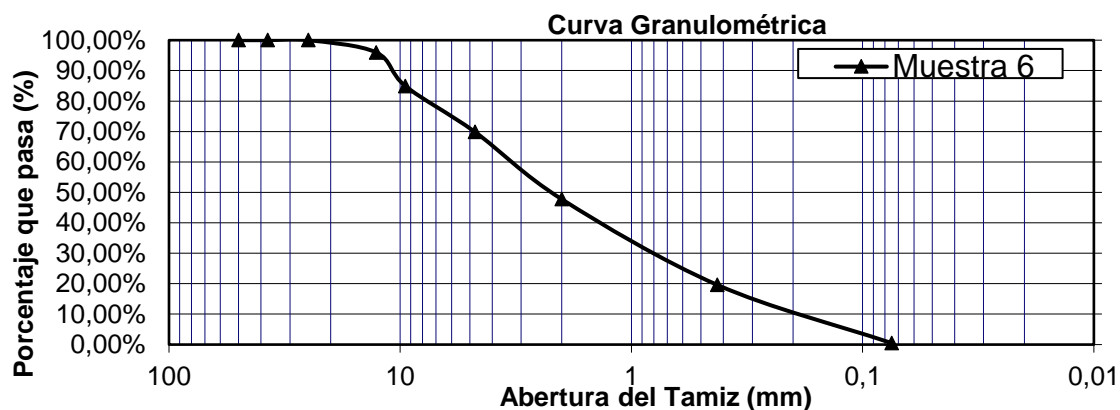


Anexo 5. Granulometría de la muestra N° 5.

Fuente: Elaboración propia.

Muestra No.	Muestra 6	Norma de referencia:	ASTM D422
--------------------	-----------	-----------------------------	-----------

Descripción de la muestra:			Material de recebo granular para subbase de pavimentos rígidos.		
Peso de la muestra seca inicial (g):			2300		
Peso de la muestra después de lavada y seca (g):			1990		
Resultados:					
Abertura del tamiz (mm)	Abertura del tamiz (ASTM D6913 - 17)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Ret. total	% Pasa total
50	2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
37.50	1 1/2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
25	1"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
12.7	1/2"	80.0	4.02%	4.02%	95.98%
9.50	3/8"	220.0	11.06%	15.08%	84.92%
4.75	No. 4	300.0	15.08%	30.15%	69.85%
2	No. 10	440.0	22.11%	52.26%	47.74%
0.425	No. 40	560.0	28.14%	80.40%	19.60%
0.075	No. 200	380.0	19.10%	99.50%	0.50%
FONDO	FONDO	10.0	0.50%	100.00%	
TOTAL		1990	100.00%	100.00%	
% Pasa Tamiz N° 200 (75 um) =		0.50%	Coeficiente de uniformidad		16.84
% Pasa Tamiz N° 10 (2 mm) =		47.74%	Coeficiente de gradación		1.05
D10 (mm)	0.19	D60 (mm)		3.20	
D30 (mm)	0.80	D80 (mm)		7.90	
D50 (mm)	2.20				

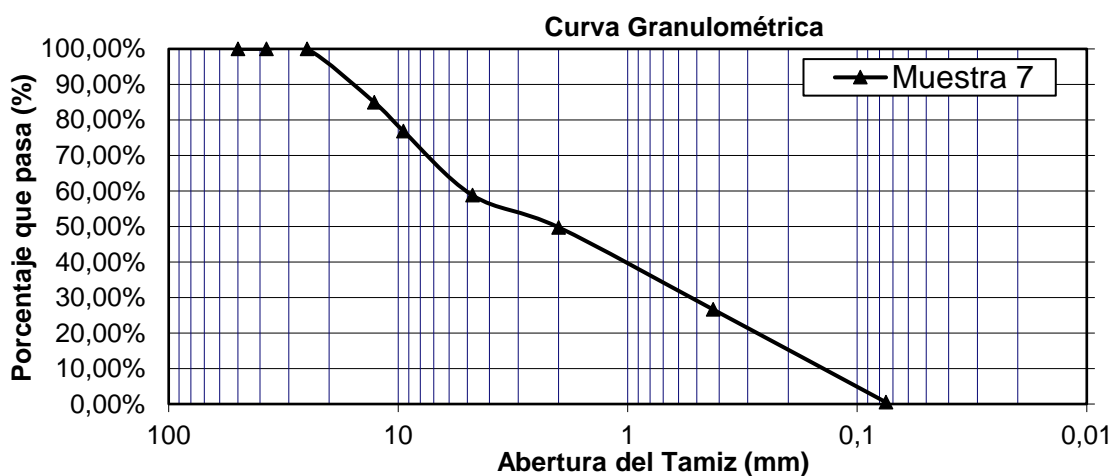


Anexo 6. Granulometría de la muestra N° 6.

Fuente: Elaboración propia.

Muestra No.	Muestra 7	Norma de referencia:	ASTM D422
--------------------	-----------	-----------------------------	-----------

Descripción de la muestra:			Material de recebo granular para subbase de pavimentos rígidos.		
Peso de la muestra seca inicial (g):			2300		
Peso de la muestra después de lavada y seca (g):			1990		
Resultados:					
Abertura del tamiz (mm)	Abertura del tamiz (ASTM D6913 - 17)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Ret. total	% Pasa total
50	2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
37.50	1 1/2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
25	1"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
12.7	1/2"	300.0	15.08%	15.08%	84.92%
9.50	3/8"	160.0	8.04%	23.12%	76.88%
4.75	No. 4	360.0	18.09%	41.21%	58.79%
2	No. 10	180.0	9.05%	50.25%	49.75%
0.425	No. 40	460.0	23.12%	73.37%	26.63%
0.075	No. 200	520.0	26.13%	99.50%	0.50%
FONDO	FONDO	10.0	0.50%	100.00%	
TOTAL		1990	100.00%	100.00%	
% Pasa Tamiz N° 200 (75 um) =		0.50%	Coeficiente de uniformidad		33.33
% Pasa Tamiz N° 10 (2 mm) =		49.75%	Coeficiente de gradación		0.39
D10 (mm)	0.15	D60 (mm)	5.00		
D30 (mm)	0.54	D80 (mm)	11.00		
D50 (mm)	2.00				

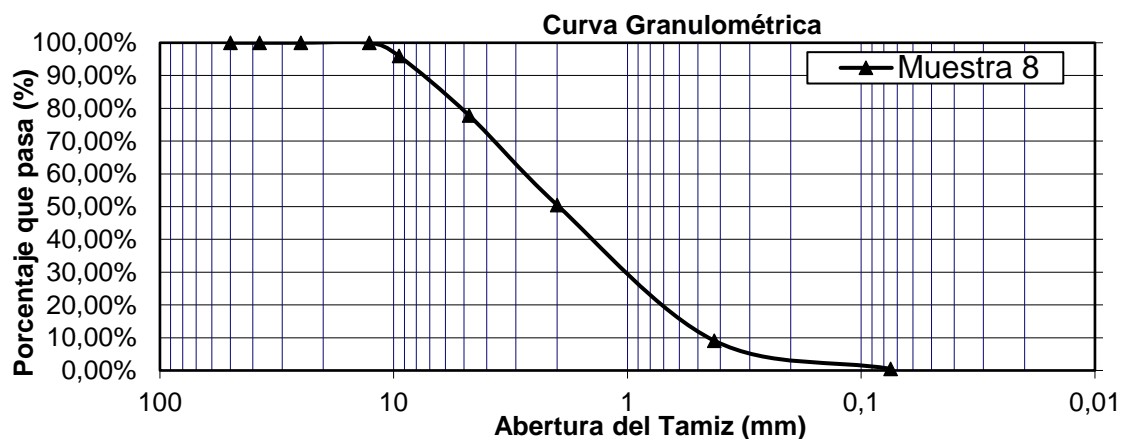


Anexo 7. Granulometría de la muestra N° 7.

Fuente: Elaboración propia.

Muestra No.	Muestra 8	Norma de referencia:	ASTM D422
--------------------	-----------	-----------------------------	-----------

Descripción de la muestra:			Material de recebo granular para subbase de pavimentos rígidos.		
Peso de la muestra seca inicial (g):			2300		
Peso de la muestra después de lavada y seca (g):			1980		
Resultados:					
Abertura del tamiz (mm)	Abertura del tamiz (ASTM D6913 - 17)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Ret. total	% Pasa total
50	2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
37.50	1 1/2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
25	1"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
12.7	1/2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
9.50	3/8"	80.0	4.04%	4.04%	95.96%
4.75	No. 4	360.0	18.18%	22.22%	77.78%
2	No. 10	540.0	27.27%	49.49%	50.51%
0.425	No. 40	820.0	41.41%	90.91%	9.09%
0.075	No. 200	170.0	8.59%	99.49%	0.51%
FONDO	FONDO	10.0	0.51%	100.00%	
TOTAL		1980	100.00%	100.00%	
% Pasa Tamiz N° 200 (75 um) =		0.51%	Coeficiente de uniformidad		6.44
% Pasa Tamiz N° 10 (2 mm) =		50.51%	Coeficiente de gradación		0.77
D10 (mm)	0.45	D60 (mm)	2.90		
D30 (mm)	1.00	D80 (mm)	5.10		
D50 (mm)	1.95				

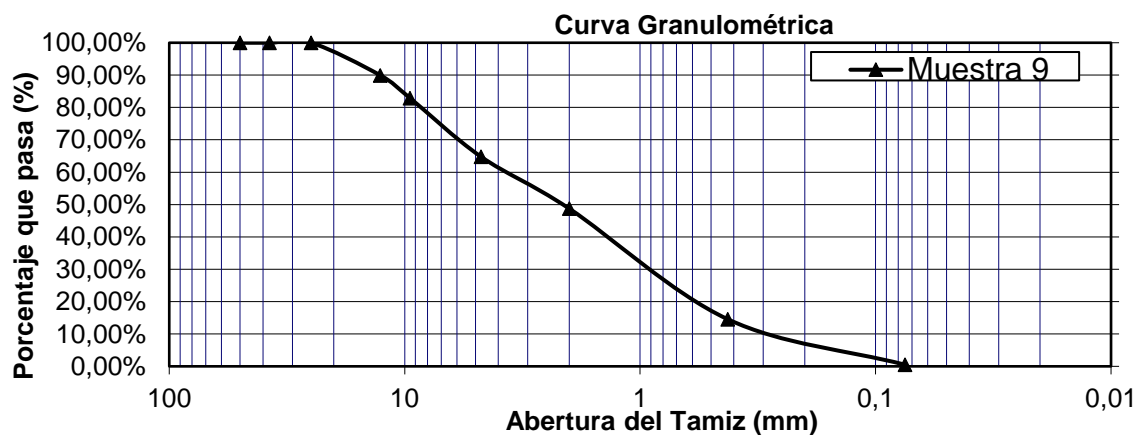


Anexo 8. Granulometría de la muestra N° 8.

Fuente: Elaboración propia.

Muestra No.	Muestra 9	Norma de referencia:	ASTM D422
--------------------	-----------	-----------------------------	-----------

Descripción de la muestra:			Material de recebo granular para subbase de pavimentos rígidos.		
Peso de la muestra seca inicial (g):			2300		
Peso de la muestra después de lavada y seca (g):			1990		
Resultados:					
Abertura del tamiz (mm)	Abertura del tamiz (ASTM D6913 - 17)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Ret. total	% Pasa total
50	2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
37.50	1 1/2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
25	1"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
12.7	1/2"	200.0	10.05%	10.05%	89.95%
9.50	3/8"	140.0	7.04%	17.09%	82.91%
4.75	No. 4	360.0	18.09%	35.18%	64.82%
2	No. 10	320.0	16.08%	51.26%	48.74%
0.425	No. 40	680.0	34.17%	85.43%	14.57%
0.075	No. 200	280.0	14.07%	99.50%	0.50%
FONDO	FONDO	10.0	0.50%	100.00%	
TOTAL		1990	100.00%	100.00%	
% Pasa Tamiz N° 200 (75 um) =		0.50%	Coeficiente de uniformidad		13.45
% Pasa Tamiz N° 10 (2 mm) =		48.74%	Coeficiente de gradación		0.72
D10 (mm)	0.29	D60 (mm)		3.90	
D30 (mm)	0.90	D80 (mm)		8.80	
D50 (mm)	2.10				

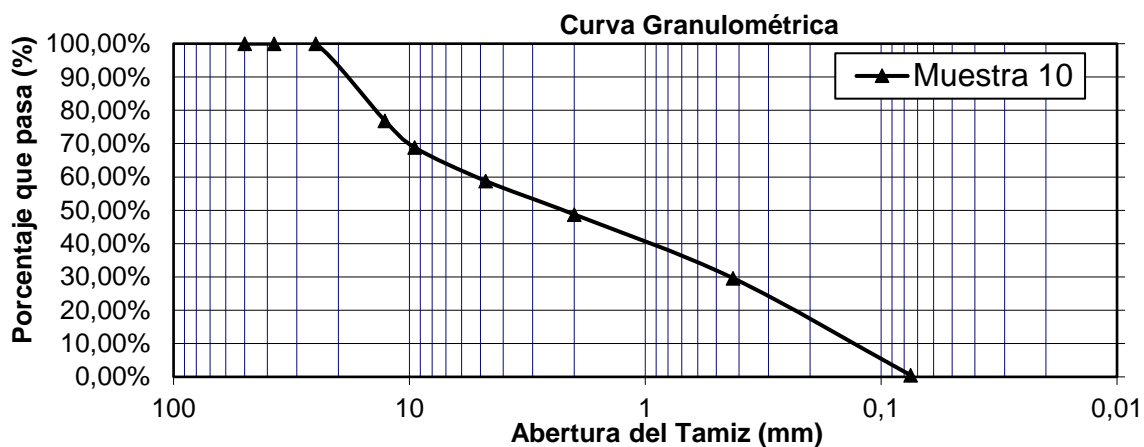


Anexo 9. Granulometría de la muestra N° 9.

Fuente: Elaboración propia.

Muestra No.	Muestra 10	Norma de referencia:	ASTM D422
--------------------	------------	-----------------------------	-----------

Descripción de la muestra:			Material de recebo granular para subbase de pavimentos rígidos.		
Peso de la muestra seca inicial (g):			2300		
Peso de la muestra después de lavada y seca (g):			1990		
Resultados:					
Abertura del tamiz (mm)	Abertura del tamiz (ASTM D6913 - 17)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Ret. total	% Pasa total
50	2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
37.50	1 1/2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
25	1"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
12.7	1/2"	460.0	23.12%	23.12%	76.88%
9.50	3/8"	160.0	8.04%	31.16%	68.84%
4.75	No. 4	200.0	10.05%	41.21%	58.79%
2	No. 10	200.0	10.05%	51.26%	48.74%
0.425	No. 40	380.0	19.10%	70.35%	29.65%
0.075	No. 200	580.0	29.15%	99.50%	0.50%
FONDO	FONDO	10.0	0.50%	100.00%	
TOTAL		1990	100.00%	100.00%	
% Pasa Tamiz N° 200 (75 um) =		0.50%	Coeficiente de uniformidad		36.43
% Pasa Tamiz N° 10 (2 mm) =		48.74%	Coeficiente de gradación		0.25
D10 (mm)	0.14	D60 (mm)	5.10		
D30 (mm)	0.42	D80 (mm)	15.00		
D50 (mm)	2.10				

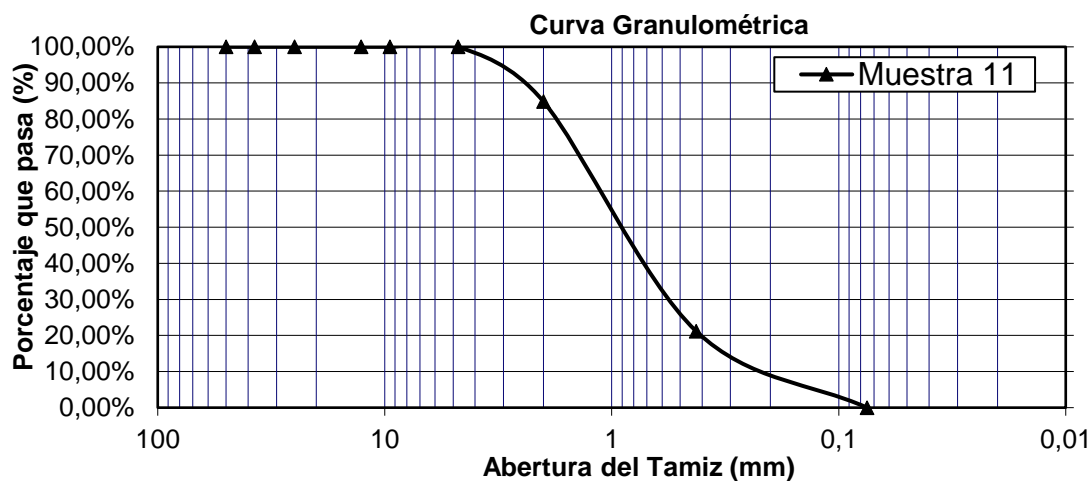


Anexo 10. Granulometría de la muestra N° 10.

Fuente: Elaboración propia.

Muestra No.	Muestra 11	Norma de referencia:	ASTM D422
--------------------	------------	-----------------------------	-----------

Descripción de la muestra:			Material de recebo granular para subbase de pavimentos rígidos.		
Peso de la muestra seca inicial (g):			2300		
Peso de la muestra después de lavada y seca (g):			1980		
Resultados:					
Abertura del tamiz (mm)	Abertura del tamiz (ASTM D6913 - 17)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Ret. total	% Pasa total
50	2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
37.50	1 1/2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
25	1"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
12.7	1/2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
9.50	3/8"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
4.75	No. 4	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
2	No. 10	300.0	15.15%	15.15%	84.85%
0.425	No. 40	1260.0	63.64%	78.79%	21.21%
0.075	No. 200	420.0	21.21%	100.00%	0.00%
FONDO	FONDO	0.0	0.00%	100.00%	
TOTAL		1980	100.00%	100.00%	
% Pasa Tamiz N° 200 (75 um) =		0.00%	Coeficiente de uniformidad		5.45
% Pasa Tamiz N° 10 (2 mm) =		84.85%	Coeficiente de gradación		1.36
D10 (mm)	0.22	D60 (mm)		1.20	
D30 (mm)	0.60	D80 (mm)		1.90	
D50 (mm)	0.90				

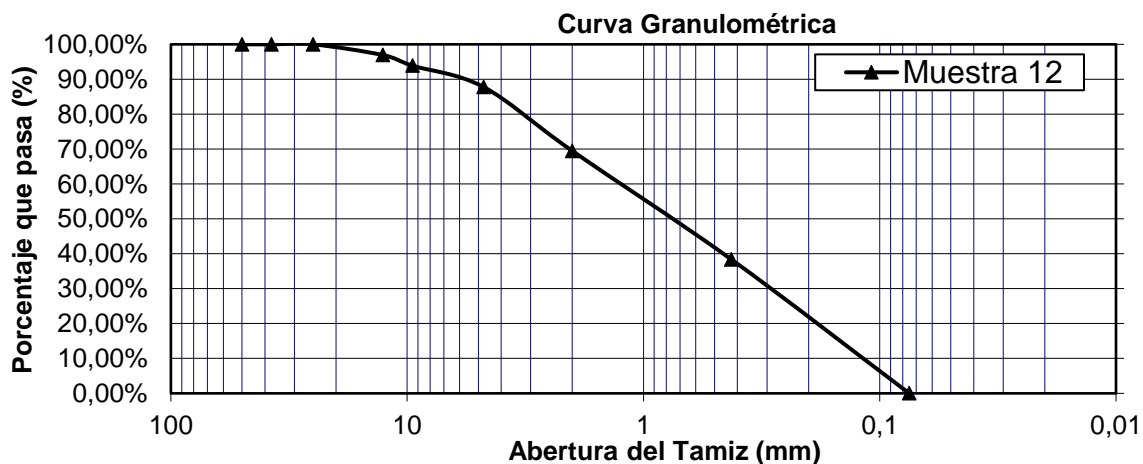


Anexo 11. Granulometría de la muestra N° 11.

Fuente: Elaboración propia.

Muestra No.	Muestra 12	Norma de referencia:	ASTM D422
--------------------	------------	-----------------------------	-----------

Descripción de la muestra:			Material de recebo granular para subbase de pavimentos rígidos.		
Peso de la muestra seca inicial (g):			2300		
Peso de la muestra después de lavada y seca (g):			1964		
Resultados:					
Abertura del tamiz (mm)	Abertura del tamiz (ASTM D6913 - 17)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Ret. total	% Pasa total
50	2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
37.50	1 1/2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
25	1"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
12.7	1/2"	60.0	3.05%	3.05%	96.95%
9.50	3/8"	60.0	3.05%	6.11%	93.89%
4.75	No. 4	120.0	6.11%	12.22%	87.78%
2	No. 10	360.0	18.33%	30.55%	69.45%
0.425	No. 40	610.0	31.06%	61.61%	38.39%
0.075	No. 200	754.0	38.39%	100.00%	0.00%
FONDO	FONDO	0.0	0.00%	100.00%	
TOTAL		1964	100.00%	100.00%	
% Pasa Tamiz N° 200 (75 um) =		0.00%	Coeficiente de uniformidad		10.83
% Pasa Tamiz N° 10 (2 mm) =		69.45%	Coeficiente de gradación		0.58
D10 (mm)	0.12	D60 (mm)	1.30		
D30 (mm)	0.30	D80 (mm)	3.20		
D50 (mm)	0.75				

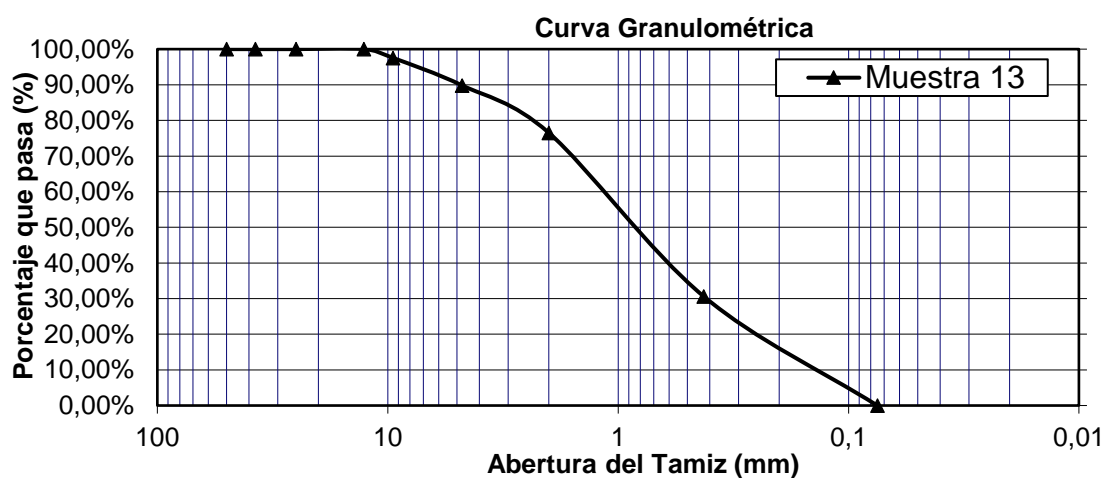


Anexo 12. Granulometría de la muestra N° 12.

Fuente: Elaboración propia.

Muestra No.	Muestra 13	Norma de referencia:	ASTM D422
--------------------	------------	-----------------------------	-----------

Descripción de la muestra:			Material de recebo granular para subbase de pavimentos rígidos.		
Peso de la muestra seca inicial (g):			2300		
Peso de la muestra después de lavada y seca (g):			1960		
Resultados:					
Abertura del tamiz (mm)	Abertura del tamiz (ASTM D6913 - 17)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Ret. total	% Pasa total
50	2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
37.50	1 1/2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
25	1"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
12.7	1/2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
9.50	3/8"	48.2	2.46%	2.46%	97.54%
4.75	No. 4	151.8	7.75%	10.20%	89.80%
2	No. 10	260.0	13.27%	23.47%	76.53%
0.425	No. 40	900.0	45.92%	69.39%	30.61%
0.075	No. 200	600.0	30.61%	100.00%	0.00%
FONDO	FONDO	0.0	0.00%	100.00%	
TOTAL		1960	100.00%	100.00%	
% Pasa Tamiz N° 200 (75 um) =		0.00%	Coeficiente de uniformidad		7.67
% Pasa Tamiz N° 10 (2 mm) =		76.53%	Coeficiente de gradación		0.97
D10 (mm)	0.15	D60 (mm)	1.15		
D30 (mm)	0.41	D80 (mm)	2.40		
D50 (mm)	0.85				

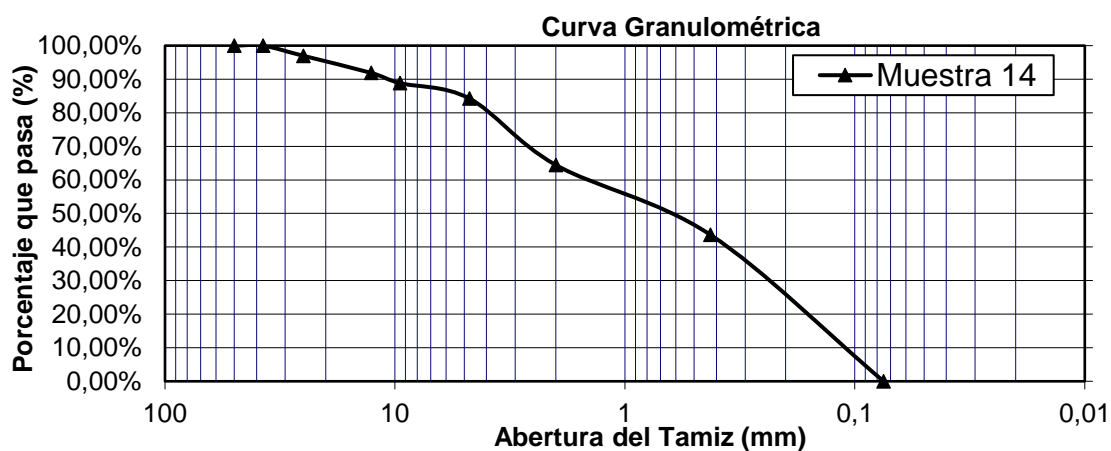


Anexo 13. Granulometría de la muestra N° 13.

Fuente: Elaboración propia.

Muestra No.	Muestra 14	Norma de referencia:	ASTM D422
--------------------	------------	-----------------------------	-----------

Descripción de la muestra:			Material de recebo granular para subbase de pavimentos rígidos.		
Peso de la muestra seca inicial (g):			2300		
Peso de la muestra después de lavada y seca (g):			1970		
Resultados:					
Abertura del tamiz (mm)	Abertura del tamiz (ASTM D6913 - 17)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Ret. total	% Pasa total
50	2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
37.50	1 1/2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
25	1"	60.0	3.05%	3.05%	96.95%
12.7	1/2"	100.0	5.08%	8.12%	91.88%
9.50	3/8"	60.0	3.05%	11.17%	88.83%
4.75	No. 4	90.0	4.57%	15.74%	84.26%
2	No. 10	390.0	19.80%	35.53%	64.47%
0.425	No. 40	410.0	20.81%	56.35%	43.65%
0.075	No. 200	860.0	43.65%	100.00%	0.00%
FONDO	FONDO	0.0	0.00%	100.00%	
TOTAL		1970	100.00%	100.00%	
% Pasa Tamiz N° 200 (75 um) =			0.00%	Coeficiente de uniformidad	14.55
% Pasa Tamiz N° 10 (2 mm) =			64.47%	Coeficiente de gradación	0.33
D10 (mm)	0.11	D60 (mm)	1.60		
D30 (mm)	0.24	D80 (mm)	3.95		
D50 (mm)	0.67				

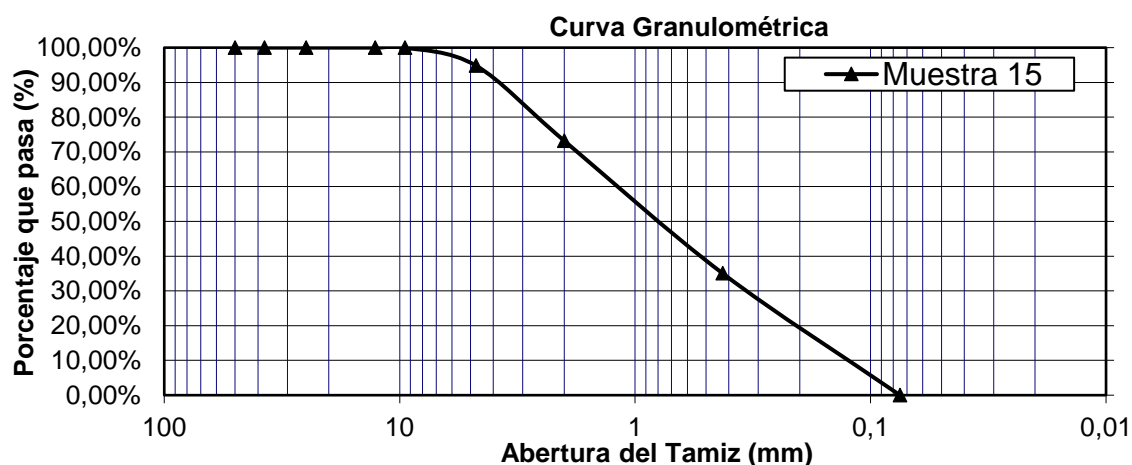


Anexo 14. Granulometría de la muestra N° 14.

Fuente: Elaboración propia.

Muestra No.	Muestra 15	Norma de referencia:	ASTM D422
--------------------	------------	-----------------------------	-----------

Descripción de la muestra:			Material de recebo granular para subbase de pavimentos rígidos.		
Peso de la muestra seca inicial (g):			2300		
Peso de la muestra después de lavada y seca (g):			1940		
Resultados:					
Abertura del tamiz (mm)	Abertura del tamiz (ASTM D6913 - 17)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Ret. total	% Pasa total
50	2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
37.50	1 1/2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
25	1"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
12.7	1/2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
9.50	3/8"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
4.75	No. 4	100.0	5.15%	5.15%	94.85%
2	No. 10	420.0	21.65%	26.80%	73.20%
0.425	No. 40	740.0	38.14%	64.95%	35.05%
0.075	No. 200	680.0	35.05%	100.00%	0.00%
FONDO	FONDO	0.0	0.00%	100.00%	
TOTAL		1940	100.00%	100.00%	
% Pasa Tamiz N° 200 (75 um) =		0.00%	Coeficiente de uniformidad		9.23
% Pasa Tamiz N° 10 (2 mm) =		73.20%	Coeficiente de gradación		0.74
D10 (mm)	0.13	D60 (mm)		1.20	
D30 (mm)	0.34	D80 (mm)		2.80	
D50 (mm)	0.80				

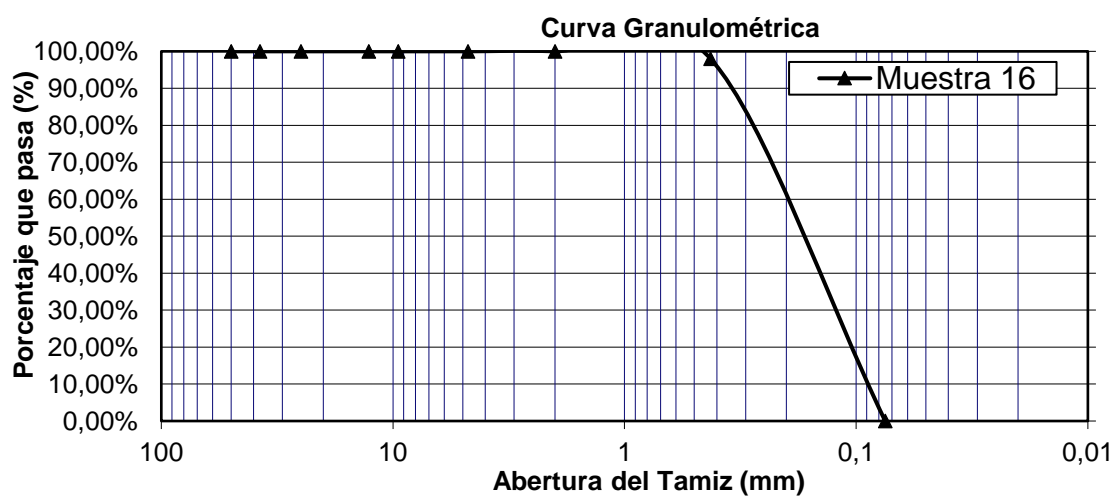


Anexo 15. Granulometría de la muestra N° 15.

Fuente: Elaboración propia.

Muestra No.	Muestra 16	Norma de referencia:	ASTM D422
--------------------	------------	-----------------------------	-----------

Descripción de la muestra:			Material de recebo granular para subbase de pavimentos rígidos.		
Peso de la muestra seca inicial (g):			2300		
Peso de la muestra después de lavada y seca (g):			1970		
Resultados:					
Abertura del tamiz (mm)	Abertura del tamiz (ASTM D6913 - 17)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Ret. total	% Pasa total
50	2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
37.50	1 1/2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
25	1"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
12.7	1/2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
9.50	3/8"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
4.75	No. 4	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
2	No. 10	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
0.425	No. 40	40.0	2.03%	2.03%	97.97%
0.075	No. 200	1930.0	97.97%	100.00%	0.00%
FONDO	FONDO	0.0	0.00%	100.00%	
TOTAL		1970	100.00%	100.00%	
% Pasa Tamiz N° 200 (75 um) =		0.00%	Coeficiente de uniformidad		2.22
% Pasa Tamiz N° 10 (2 mm) =		100.00%	Coeficiente de gradación		0.94
D10 (mm)	0.09	D60 (mm)	0.20		
D30 (mm)	0.13	D80 (mm)	0.29		
D50 (mm)	0.18				

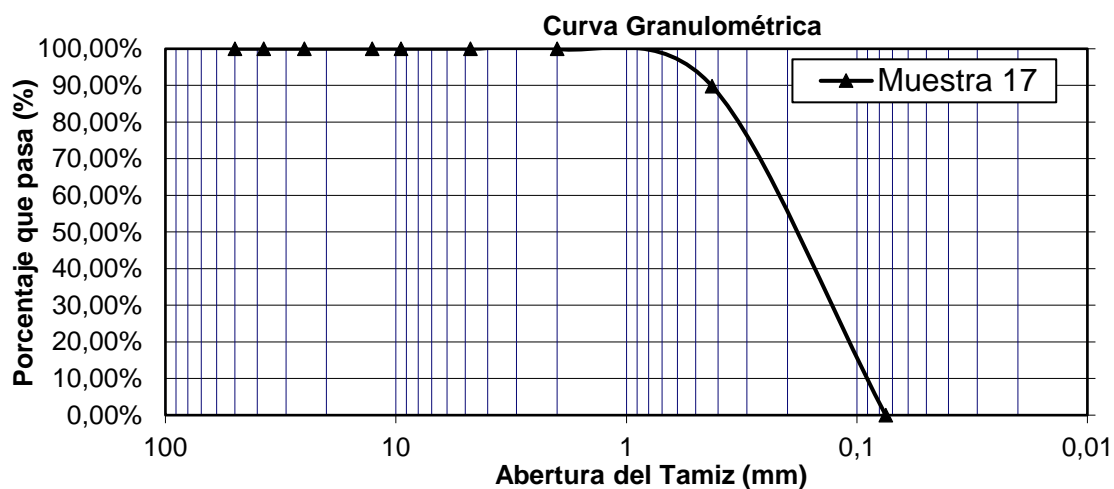


Anexo 16. Granulometría de la muestra N° 16.

Fuente: Elaboración propia.

Muestra No.	Muestra 17	Norma de referencia:	ASTM D422
--------------------	------------	-----------------------------	-----------

Descripción de la muestra:			Material de recebo granular para subbase de pavimentos rígidos.		
Peso de la muestra seca inicial (g):			2300		
Peso de la muestra después de lavada y seca (g):			1960		
Resultados:					
Abertura del tamiz (mm)	Abertura del tamiz (ASTM D6913 - 17)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Ret. total	% Pasa total
50	2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
37.50	1 1/2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
25	1"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
12.7	1/2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
9.50	3/8"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
4.75	No. 4	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
2	No. 10	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
0.425	No. 40	200.0	10.20%	10.20%	89.80%
0.075	No. 200	1760.0	89.80%	100.00%	0.00%
FONDO	FONDO	0.0	0.00%	100.00%	
TOTAL		1960	100.00%	100.00%	
% Pasa Tamiz N° 200 (75 um) =		0.00%	Coeficiente de uniformidad		2.44
% Pasa Tamiz N° 10 (2 mm) =		100.00%	Coeficiente de gradación		0.99
D10 (mm)	0.09	D60 (mm)	0.22		
D30 (mm)	0.14	D80 (mm)	0.32		
D50 (mm)	0.19				

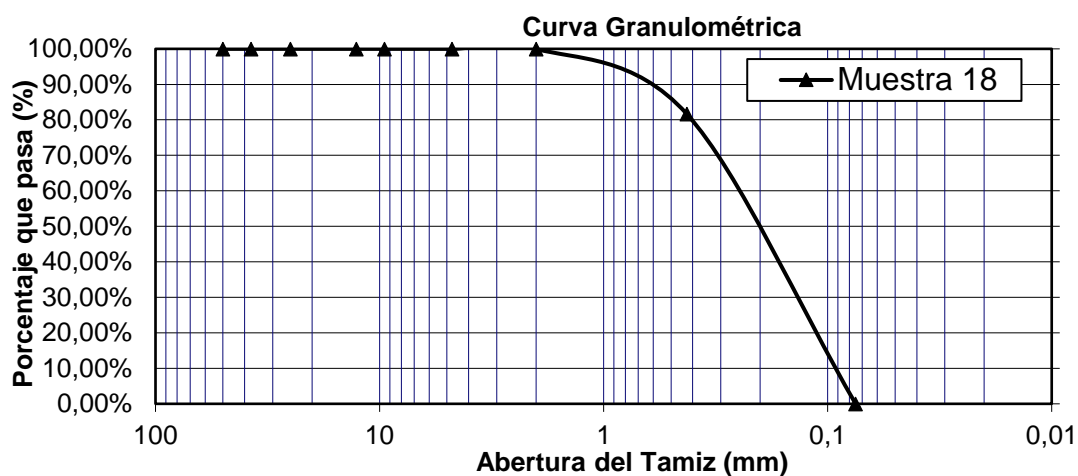


Anexo 17. Granulometría de la muestra N° 17.

Fuente: Elaboración propia.

Muestra No.	Muestra 18	Norma de referencia:	ASTM D422
--------------------	------------	-----------------------------	-----------

Descripción de la muestra:			Material de recebo granular para subbase de pavimentos rígidos.		
Peso de la muestra seca inicial (g):			2300		
Peso de la muestra después de lavada y seca (g):			1960		
Resultados:					
Abertura del tamiz (mm)	Abertura del tamiz (ASTM D6913 - 17)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Ret. total	% Pasa total
50	2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
37.50	1 1/2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
25	1"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
12.7	1/2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
9.50	3/8"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
4.75	No. 4	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
2	No. 10	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
0.425	No. 40	360.0	18.37%	18.37%	81.63%
0.075	No. 200	1600.0	81.63%	100.00%	0.00%
FONDO	FONDO	0.0	0.00%	100.00%	
TOTAL		1960	100.00%	100.00%	
% Pasa Tamiz N° 200 (75 um) =		0.00%	Coeficiente de uniformidad		2.72
% Pasa Tamiz N° 10 (2 mm) =		100.00%	Coeficiente de gradación		0.85
D10 (mm)	0.092	D60 (mm)	0.25		
D30 (mm)	0.14	D80 (mm)	0.30		
D50 (mm)	0.20				

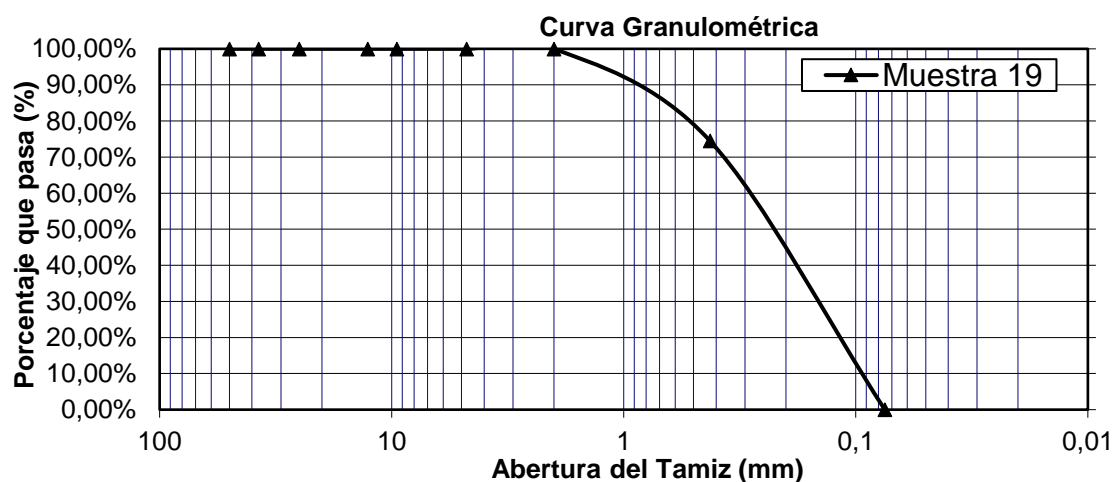


Anexo 18. Granulometría de la muestra N° 18.

Fuente: Elaboración propia.

Muestra No.	Muestra 19	Norma de referencia:	ASTM D422
--------------------	------------	-----------------------------	-----------

Descripción de la muestra:			Material de recebo granular para subbase de pavimentos rígidos.		
Peso de la muestra seca inicial (g):			2300		
Peso de la muestra después de lavada y seca (g):			1960		
Resultados:					
Abertura del tamiz (mm)	Abertura del tamiz (ASTM D6913 - 17)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Ret. total	% Pasa total
50	2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
37.50	1 1/2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
25	1"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
12.7	1/2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
9.50	3/8"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
4.75	No. 4	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
2	No. 10	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
0.425	No. 40	500.0	25.51%	25.51%	74.49%
0.075	No. 200	1460.0	74.49%	100.00%	0.00%
FONDO	FONDO	0.0	0.00%	100.00%	
TOTAL		1960	100.00%	100.00%	
% Pasa Tamiz N° 200 (75 um) =		0.00%	Coeficiente de uniformidad		3.05
% Pasa Tamiz N° 10 (2 mm) =		100.00%	Coeficiente de gradación		0.93
D10 (mm)	0.095	D60 (mm)	0.29		
D30 (mm)	0.16	D80 (mm)	0.51		
D50 (mm)	0.22				

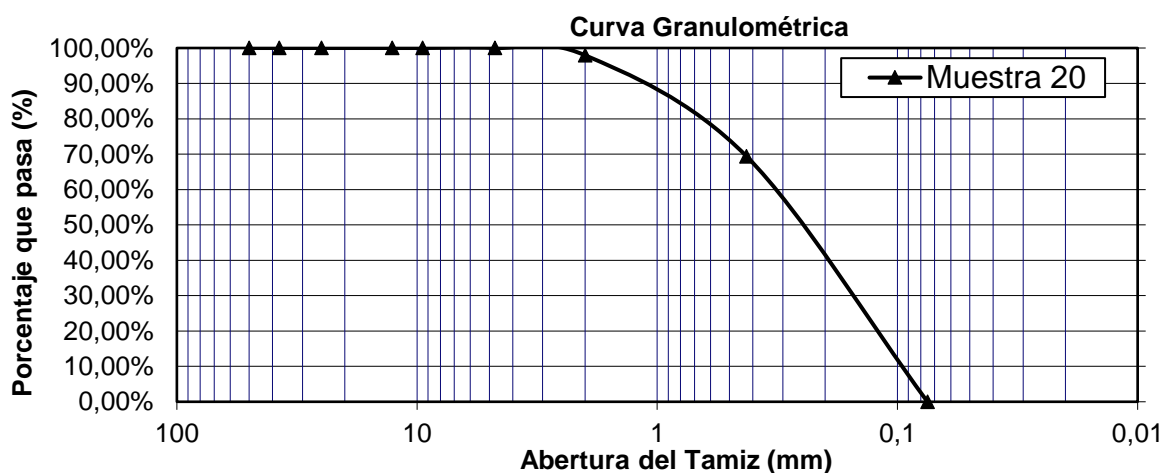


Anexo 19. Granulometría de la muestra N° 19.

Fuente: Elaboración propia.

Muestra No.	Muestra 20	Norma de referencia:	ASTM D422
--------------------	------------	-----------------------------	-----------

Descripción de la muestra:			Material de recebo granular para subbase de pavimentos rígidos.		
Peso de la muestra seca inicial (g):			2300		
Peso de la muestra después de lavada y seca (g):			1960		
Resultados:					
Abertura del tamiz (mm)	Abertura del tamiz (ASTM D6913 - 17)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Ret. total	% Pasa total
50	2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
37.50	1 1/2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
25	1"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
12.7	1/2"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
9.50	3/8"	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
4.75	No. 4	0.0	0.00%	0.00%	100.00%
2	No. 10	40.0	2.04%	2.04%	97.96%
0.425	No. 40	560.0	28.57%	30.61%	69.39%
0.075	No. 200	1360.0	69.39%	100.00%	0.00%
FONDO	FONDO	0.0	0.00%	100.00%	
TOTAL		1960	100.00%	100.00%	
% Pasa Tamiz N° 200 (75 um) =		0.00%	Coeficiente de uniformidad		3.16
% Pasa Tamiz N° 10 (2 mm) =		97.96%	Coeficiente de gradación		0.95
D10 (mm)	0.098	D60 (mm)		0.31	
D30 (mm)	0.17	D80 (mm)		0.64	
D50 (mm)	0.25				



Anexo: Granulometría de la muestra N° 20.

Fuente: Elaboración propia.